



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR -TE 141599

**KENDALI KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA
MENGUNAKAN KONTROLER *FUZZY*-PID**

Buhari Muslim
NRP 2210 100 087

Dosen Pembimbing
Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT -TE 141599

Speed control of Three Phasa Induction Motor Using Fuzzy-PID Controller.

Buhari Muslim
NRP 2210 100 087

Supervisor
Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

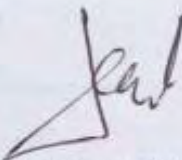
**KENDALI KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA
MENGUNAKAN KONTROLER *FUZZY*-PID**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing



Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.
NIP.196210051990031003



KENDALI KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA MENGUNAKAN KONTROLER *FUZZY*-PID

Nama : Buhari Muslim
Pembimbing : Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.

ABSTRAK

Tugas akhir ini membahas desain kontroler *fuzzy*-PID pada *plant* motor induksi tiga fasa. Motor induksi tiga fasa merupakan jenis motor yang sering digunakan pada dunia industri. Hal ini dikarenakan kelebihan dari motor induksi tiga fasa yaitu konstruksinya sederhana, harganya murah dan murah dalam pemeliharaan. Namun pengaturan kecepatan motor induksi jauh lebih sulit dibandingkan motor DC. Untuk mengatur kecepatan motor induksi pada kecepatan tetap diperlukan pengaturan terhadap frekuensi atau torsi, padahal tidak ada hubungan yang linear antara arus motor dengan torsi yang dihasilkan.

Permasalahan pada tugas akhir ini adalah sulitnya menjaga kecepatan putar motor induksi tiga fasa agar tetap konstan pada saat terjadi perubahan beban. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan sebuah desain kontroler. Metode kontrol yang digunakan adalah *fuzzy*-PID. Metode kombinasi ini dipilih karena kontroler PID hanya dapat mengatasi *plant* satu fungsi alih saja, sehingga kontroler *fuzzy* diperlukan untuk metode penalaan terhadap parameter PID.

Implementasi kontroler *fuzzy*-PID dilakukan oleh DAQ Advantech tipe USB 4716 dengan bantuan *software* LabView. Hasil implementasi menunjukkan bahwa respon dapat mempertahankan kecepatan mendekati nilai *set point* dengan *error* 0,67% - 1,7%. Dan spesifikasi respon beban minimal dan maksimal telah mendekati respon beban nominal, dengan rata-rata $t_s(5\%)$ sebesar 0,67 detik, $t_r(10\% - 90\%)$ sebesar 0,45 detik, dan t_d sebesar 0,16 detik.

Kata Kunci: DAQ Advantech, *Fuzzy*-PID, Motor Induksi Tiga Fasa.

Halaman ini sengaja dikosongkan

SPEED CONTROL OF THREE PHASE INDUCTION MOTOR USING FUZZY-PID CONTROLLER

Name : Buhari Muslim
Supervisor : Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.

ABSTRACT

This final project explores the fuzzy-PID controller design in three-phase induction motor plant. Three phase induction motor is a type of motor that is often used in the industrial world. This is because the advantages of the three-phase induction motor is simple construction, low cost and low in maintenance. However, the induction motor speed control is much more difficult than DC motors. To adjust the speed of the induction motor at a constant speed required for frequency setting or torque, but there is no linear relationship between current motor with torque generated.

Problems in this final project is the difficulty of keeping the rotational speed three-phase induction motor to remain constant in the event of load changes. To overcome these problems, we need a controller design. Control method used is the fuzzy-PID. A combination of methods have been selected PID controller can only be overcome plant transfer function only, so the fuzzy controller is required for tuning method for PID parameters.

Implementation of Fuzzy-PID controller made by Advantech DAQ USB type 4716 with the help of software Labview. The implementation results show that the response can maintain speeds approaching the set point value with an error of 0.67% - 1.7%. And the specification of minimum and maximum load response has approached the nominal load response, with an average of $t_s(5\%)$ by 0.67 seconds, t_r (10% - 90%) by 0.45 seconds and 0.16 seconds t_d .

Keyword: DAQ Advantech, Fuzzy-PID, Three Phase Induction Motor.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena atas segala rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Shalawat dan salam juga penulis sampaikan kepada Rasulullah Muhammad SAW yang telah menjadi teladan bagi penulis.

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan Strata-1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan judul:

KENDALI KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA MENGGUNAKAN KONTROLER *FUZZY*-PID

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, penulis mendapat banyak sekali bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala hormat, penulis mengucapkan terima kasih kepada Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah sabar dalam membimbing, orang tua, seluruh keluarga, tim, dan semua pihak yang memberikan dukungan penuh kepada penulis dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa pengerjaan tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu, penulis memohon maaf atas segala kekurangan dalam buku tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	v
HALAMAN PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	3
1.5 Sistematika	3
1.6 Relevansi	3
 BAB II LANDASAN TEORI	 5
2.1 Motor Induksi 3 Fasa	5
2.1.1 Konstruksi Motor Induksi 3 Fasa	5
2.1.1.1 Stator	6
2.1.1.2 Rotor	6
2.1.2 Prinsip Kerja Motor Induksi	8
2.2 Sensor Kecepatan <i>Rotary Encoder</i>	9
2.3 Rem Elektromagnetik	10
2.4 <i>Inverter</i> Siemens Micromaster 420	11
2.5 <i>Data Acquisition</i> (DAQ) USB 4716 <i>Advantech</i>	13
2.6 Pemodelan Sistem	15
2.7 Validasi Sistem	15
2.8 Kontroler PID	16
2.9 Logika <i>Fuzzy</i>	19
2.9.1 Himpunan <i>Fuzzy</i>	19
2.9.2 Fungsi Keanggotaan	20
2.9.3 Operasi Himpunan <i>Fuzzy</i>	22
2.9.4 Sistem Inferensi <i>Fuzzy</i>	23

BAB III PERANCANGAN SISTEM	25
3.1 Gambaran Umum Sistem	25
3.2 Perancangan Perangkat Keras	26
3.2.1 Perancangan Mekanik.....	27
3.2.1.1 Motor Induksi 3 Fasa	28
3.2.1.2 Rem Elektromagnetik	29
3.2.1.3 Sensor <i>Rotary Encoder</i>	30
3.2.1.4 Kontak Panel.....	31
3.2.2 Perancangan Elektrik	32
3.2.2.1 <i>Inverter</i> Siemens Micromaster 420	32
3.2.2.2 DAQ USB 4716 Advantech	35
3.2.2.3 Sensor Arus Keyes	35
3.2.2.4 Sensor Temperatur	37
3.3 Perancangan Perangkat Lunak.....	38
3.3.1 Perangkat Lunak Matlab R2010a.....	38
3.3.2 Perangkat Lunak Labview 2013	38
3.3.3 Perangkat Lunak Advantech Navigator	39
3.4 Pemodelan <i>Plant</i>	39
3.4.1 Konfigurasi Perangkat Keras dan Perangkat Lunak	40
3.4.2 Pemilihan Metode	41
3.4.3 Identifikasi Beban Minimal.....	42
3.4.4 Identifikasi Beban Nominal.....	43
3.4.5 Identifikasi Beban Maksimal.....	43
3.5 Perancangan Kontroler <i>Fuzzy</i> -PID	44
3.5.1 Perancangan Kontroler PID	45
3.5.2 Perancangan Mekanisme Penalaan dengan Kontroler <i>Fuzzy</i>	48
3.5.2.1 Fungsi Keanggotaan Masukan	48
3.5.2.2 Fungsi Keanggotaan Keluaran	49
3.5.2.3 <i>Rule Base</i>	51
3.5.2.4 Defuzzifikasi	52
3.5.3 Perancangan Simulasi.....	52
3.5.4 Perancangan Implementasi	55
 BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA	 57
4.1 Pengujian Perangkat Keras.....	57
4.1.1 Pengujian DAQ Advantech dan <i>Inverter</i>	57
4.1.2 Pengujian <i>Encoder</i>	58
4.1.3 Pengujian Sensor Temperatur	60

4.1.4 Pengujian Rem Elektromagnetik	61
4.1.5 Pengujian Sensor Arus pada Rem Elektromagnetik ..	62
4.2 Pengujian Simulasi Kontroler	63
4.2.1 Pengujian Parameter Kontroler PID	63
4.2.2 Pengujian Kontroler <i>Fuzzy</i> -PID pada Beban Berubah	64
4.3 Pengujian Implementasi Kontroler	66
4.3.1 Pengujian Kontroler PID pada Beban Berubah.....	67
4.3.2 Pengujian Kontroler <i>Fuzzy</i> -PID pada Beban Berubah	70
4.4 Analisis.....	74
 BAB V PENUTUP	 75
5.1 Kesimpulan	75
5.2 Saran	76
DAFTAR PUSTAKA	77
LAMPIRAN	79
RIWAYAT HIDUP	87

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Fungsi Tombol <i>Inverter</i> Micromaster	13
Tabel 2.2	Spesifikasi DAQ USB 4716 Advantech	14
Tabel 2.3	Kinerja Kendali PID	17
Tabel 3.1	Spesifikasi Motor Induksi 3 fasa	28
Tabel 3.2	Spesifikasi <i>Rotary Encoder</i> Autonics E30S4-100-3-N-5	30
Tabel 3.3	Langkah-Langkah <i>Quick Commissioning</i>	32
Tabel 3.4	Fungsi Alih dari Dua Metode	42
Tabel 3.5	Hasil Identifikasi pada Beban Minimal	42
Tabel 3.6	Hasil Identifikasi pada Beban Nominal	43
Tabel 3.7	Hasil Identifikasi pada Beban Maksimal	44
Tabel 3.8	Parameter Kontroler PID	47
Tabel 3.9	<i>Rule Base</i> untuk Penalaan Parameter PID	52
Tabel 4.1	Hasil Pengujian DAQ dan <i>Inverter</i>	58
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Motor Induksi dan Sensor <i>Rotary Encoder</i>	59
Tabel 4.3	Hasil Pengujian Sensor Temperatur dan LED indikator	60
Tabel 4.4	Hasil Pengujian Rem Elektromagnetik.....	62
Tabel 4.5	Hasil Pengujian Arus Kumparan Rem Elektromagnetik dan Sensor ACS712-5	62
Tabel 4.6	Spesifikasi Hasil Simulasi dengan Kontroler PID.....	64
Tabel 4.7	Spesifikasi Respon Kontroler <i>Fuzzy</i> -PID Fungsi Keanggotaan Segitiga	65
Tabel 4.8	Spesifikasi Respon Kontroler <i>Fuzzy</i> -PID Fungsi Keanggotaan <i>Singleton</i>	65
Tabel 4.9	Spesifikasi Hasil Implementasi Kontroler PID.....	69
Tabel 4.10	Spesifikasi Hasil Implementasi dengan Kontroler <i>Fuzzy</i> -PID.....	73

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Penampang Stator dan Rotor Motor Induksi	5
Gambar 2.2	Komponen Stator Motor Induksi 3 Fasa	6
Gambar 2.3	Konstruksi Rotor Belitan Motor Induksi 3 Fasa	7
Gambar 2.4	Skematik Diagram Motor Induksi Rotor Belitan.....	7
Gambar 2.5	Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Tupai.....	8
Gambar 2.6	Blok Penyusun <i>Rotary Encoder</i>	9
Gambar 2.7	Rangkaian Tipikal Penghasil Pulsa pada <i>Rotary Encode</i>	10
Gambar 2.8	Contoh Bentuk Fisik Rem Elektromagnetik	11
Gambar 2.9	Gaya Pengereman Arus <i>Eddy</i>	11
Gambar 2.10	Bentuk Fisik <i>Inverter</i> Siemens Micromaster 420	12
Gambar 2.11	Operator Panel BOP dan AOP.....	12
Gambar 2.12	Bagian-Bagian dari DAQ USB 4716 Advantech.....	14
Gambar 2.13	Bentuk Fisik DAQ USB 4716.....	15
Gambar 2.14	Blok Kontroler PID.....	17
Gambar 2.15	Bentuk-Bentuk Fungsi Keanggotaan	21
Gambar 2.16	Struktur Dasar Sistem Kontrol <i>Fuzzy</i>	24
Gambar 3.1	Diagram Blok Sistem dengan Kontroler <i>Fuzzy</i> -PID.....	25
Gambar 3.2	Perancangan Perangkat Keras.....	26
Gambar 3.3	Bentuk <i>Plant</i> Setelah Dimodifikasi.....	27
Gambar 3.4	Motor Induksi 3 Fasa yang Digunakan.....	29
Gambar 3.5	Konstruksi Rem Elektromagnetik.....	29
Gambar 3.6	<i>Rotary Encoder</i> Autonics E30S4-100-3-N-5	30
Gambar 3.7	Bentuk Fisik Kotak Panel bagian luar dan dalam.	31
Gambar 3.8	<i>Wiring</i> DAQ dengan Beberapa Komponen	35
Gambar 3.9	Pemasangan Sensor Arus dengan Rem Elektromagnetik	36
Gambar 3.10	Modul <i>Keyes Current Sensor</i>	36
Gambar 3.11	<i>Wiring</i> Perancangan Sensor Temperatur.....	37
Gambar 3.12	Mekanisme Proses Identifikasi	40
Gambar 3.13	<i>Front Panel</i> Labview 2013 untuk Memonitor Respon <i>Plant</i>	41
Gambar 3.14	Fungsi Keanggotaan Masukan Kontroler.....	49
Gambar 3.15	Fungsi Keanggotaan Segitiga Keluaran K_p	49
Gambar 3.16	Fungsi Keanggotaan Segitiga Keluaran τ_i	50
Gambar 3.17	Fungsi Keanggotaan Segitiga Keluaran τ_d	50

Gambar 3.18	Fungsi Keanggotaan <i>Singleton</i> Keluaran K_p	51
Gambar 3.19	Fungsi Keanggotaan <i>Singleton</i> Keluaran τ_i	51
Gambar 3.20	Fungsi Keanggotaan <i>Singleton</i> Keluaran τ_d	51
Gambar 3.21	Perancangan Simulasi Kontroler <i>Fuzzy</i> -PID.....	53
Gambar 3.22	<i>Subsystem</i> Kontroler PID	54
Gambar 3.23	Perancangan Implementasi Kontroler <i>Fuzzy</i> -PID	55
Gambar 4.1	Skema Pengujian DAQ dan <i>Inverter 420</i>	57
Gambar 4.2	Mekanisme Pengujian <i>Encoder</i>	58
Gambar 4.3	Hubungan Hasil Pengukuran <i>Encoder</i> dan <i>Tachometer</i>	60
Gambar 4.4	Efek Pembebanan <i>Plant</i>	61
Gambar 4.5	Hasil Simulasi dengan Kontroler PID	64
Gambar 4.6	Hasil Simulasi Kontroler <i>Fuzzy</i> -PID Fungsi Keanggo- taan Segitiga	65
Gambar 4.7	Hasil Simulasi Kontroler <i>Fuzzy</i> -PID Fungsi Keanggo- taan <i>Singleton</i>	66
Gambar 4.8	Hasil Implementasi Beban Minimal dengan Kontroler PID.....	67
Gambar 4.9	Sinyal Kontrol PID Beban Minimal	67
Gambar 4.10	Hasil Implementasi Beban Nominal dengan Kontroler PID.....	68
Gambar 4.11	Sinyal Kontrol PID Beban Nominal	68
Gambar 4.12	Hasil Implementasi Beban Maksimal dengan Kontroler PID.....	69
Gambar 4.13	Sinyal Kontrol PID Beban Maksimal	69
Gambar 4.14	Hasil Implementasi Beban Minimal dengan Kontroler <i>Fuzzy</i> -PID.....	70
Gambar 4.15	Sinyal Kontrol <i>Fuzzy</i> -PID Beban Minimal	70
Gambar 4.16	Hasil Implementasi Beban Nominal dengan Kontroler <i>Fuzzy</i> -PID	71
Gambar 4.17	Sinyal Kontrol <i>Fuzzy</i> -PID Beban Nominal	71
Gambar 4.18	Hasil Implementasi Beban Maksimal dengan Kontroler <i>Fuzzy</i> -PID.....	72
Gambar 4.19	Sinyal Kontrol <i>Fuzzy</i> -PID Beban Maksimal	72
Gambar 4.20	Perbandingan Implementasi Kontroler pada Tiga Kon- disi Pembebanan	73
Gambar 4.21	Respon Implementasi <i>Fuzzy</i> -PID dengan Pemberian Beban Nominal dan Beban Maksimal.....	74

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Untuk menunjang perkembangan infrastruktur industri modern yang lebih efisien dan handal, terutama mesin-mesin canggih yang digunakan dalam proses produksi, maka mesin harus dalam kondisi dan performa yang benar-benar sempurna untuk menjaga kuantitas dan kualitas produksi. Salah satu cara meningkatkan performansi adalah dengan menggunakan mesin yang handal dan kuat namun harga relatif murah. Kriteria tersebut ada pada motor induksi tiga fasa, yaitu konstruksinya sederhana, handal, harganya murah, dan pemeliharaannya juga murah. Salah satu yang menjadi kelemahan motor induksi adalah pengaturan kecepatannya lebih sulit dibandingkan motor DC. Untuk mengatur kecepatan motor induksi pada kecepatan konstan diperlukan pengaturan terhadap frekuensi atau torsi, padahal tidak ada hubungan yang linear antara arus motor dengan torsi yang dihasilkan.

Pada aplikasinya motor induksi dituntut untuk bekerja pada kecepatan yang konstan meski dalam pembebanan yang berubah-ubah. Sedangkan motor induksi dengan bertambahnya beban yang diberikan akan memperbesar kopel motor sehingga akan memperbesar arus induksi pada rotor yang menyebabkan *slip* antara medan putar dan putaran rotor juga akan bertambah besar. Perubahan beban ini akan menyebabkan kecepatan putar motor induksi tidak stabil.

Pada penelitian ini, motor induksi diharapkan dapat beradaptasi dengan cepat terhadap beban yang berubah-ubah. Metode pembebanan yang dilakukan adalah dengan memberikan pengereman elektromagnetik pada motor induksi dengan tiga kondisi pengereman. Yaitu beban minimal, beban nominal, dan beban maksimal.

Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan metode kontrol yang dapat beradaptasi dengan perubahan beban yang diberikan. Kontroler yang dipilih untuk mengatasi masalah pembebanan pada motor induksi tiga fasa ini adalah kontroler *fuzzy*-PID. Kontroler PID dipilih karena perhitungannya yang sederhana dan mudah diimplementasikan. Akan tetapi, kontroler PID tidak dapat digunakan jika terjadi perubahan beban yang mengakibatkan perubahan respon sistem. Hal ini dikarenakan kontroler PID hanya dapat bekerja sesuai dengan spesifikasi respon pada satu fungsi alih saja. Sehingga, diperlukan kontroler *fuzzy* yang digunakan untuk penalaan terhadap parameter kontroler PID. Dengan

metode kontroler *fuzzy*, parameter K_p , τ_i , dan τ_d dapat disesuaikan dengan kondisi pembebanan.

1.2 Permasalahan

Dari uraian latar belakang, diperlukan adanya penyesuaian kecepatan motor induksi dari tidak ada beban menjadi ada beban. Respon kecepatan motor induksi pada proses pengereman harus dapat dipertahankan walaupun terjadi perubahan beban. Perubahan beban dapat diketahui dari perubahan arus, semakin besar arus yang diberikan pada rem elektromagnetik maka juga akan semakin besar daya hambat (pengereman) terhadap kecepatan motor, sehingga motor induksi tidak lagi mengikuti *set point* yang diberikan.

Oleh karena itu, diperlukan suatu desain kontroler yang mampu menjaga kecepatan motor induksi tetap stabil selama proses pengereman berlangsung. Metode kontroler yang digunakan adalah kontroler *fuzzy*-PID dengan harapan dapat menjaga kecepatan tetap stabil pada saat pengereman

1.3 Batasan Masalah

Dari subbab Permasalahan 1.2 ada beberapa hal yang perlu dibatasi, sehingga penelitian yang dilakukan dapat tercapai. Batasan masalah dalam pengerjaan tugas akhir ini, yaitu:

1. Pengontrolan dilakukan pada kecepatan.
2. Metode kontrol yang digunakan adalah *fuzzy*-PID
3. Pembebanan diberikan dengan menggunakan rem elektromagnetik dengan 3 kondisi pembebanan. Beban minimal (0 Volt), beban nominal (140 Volt), dan beban maksimal (220).
4. Daya magnet yang digunakan oleh rem magnetik tidak diperhitungkan secara matematis.
5. Kontroler *fuzzy*-PID ditanamkan ke *software* Labview 2013 dengan *interface* ke perangkat keras DAQ Advantech.
6. Analisa hasil pengujian dititik beratkan pada analisa respon *steady state*, t_s (5%), t_r (10% - 90%), dan t_d pada *plant*.

Dengan adanya batasan masalah ini diharapkan hasil akhir dari tugas akhir ini dapat tercapai sebagai mana mestinya.

1.4 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah mengimplementasikan kontroler *fuzzy*-PID untuk menjaga kecepatan putar motor induksi agar tetap konstan meskipun dalam kondisi beban berubah-ubah.

1.5 Sistematika

Pembahasan dalam tugas akhir ini dibagi menjadi 5 bab dengan sistematika sebagai berikut:

Bab I : Pendahuluan

Bab ini meliputi latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, sistematika dan relevansi

Bab II : Tinjauan Pustaka

Bab ini menjelaskan tentang tinjauan pustaka motor induksi tiga fasa, rem elektromagnetik, sensor *rotary encoder*, *inverter*, DAQ, pemodelan sistem, validasi model, kontroler PID, dan Logika *fuzzy*.

Bab III : Perancangan Simulasi dan implementasi

Bab ini membahas desain simulasi dan desain sistem kontrol *fuzzy*-PID yang diimplementasikan pada *plant* motor induksi tiga fasa. Selain itu juga dijelaskan koneksi antar komponen yang digunakan dalam tugas akhir ini.

Bab IV : Pengujian dan Analisis Sistem

Bab ini berisi hasil pengujian pada tiap komponen penunjang dan dilanjutkan pada analisis hasil simulasi dan implementasi.

Bab V : Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari sistem yang telah dibuat dari hasil pembahasan yang telah diperoleh. Dan juga berisi saran untuk perbaikan yang diperlukan saat penelitian berikutnya.

1.6 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan menjadi referensi perencanaan desain, pengembangan dan perbandingan metode kontrol yang tepat untuk sistem yang menggunakan motor induksi tiga fasa di masa mendatang.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TEORI PENUNJANG

Bab II membahas mengenai teori penunjang yang dijadikan acuan dalam melakukan tugas akhir. Secara keseluruhan bab ini dibagi menjadi 9 subbab yaitu motor induksi tiga fasa, sensor *rotary encoder*, rem elektromagnetik, *inverter*, DAQ, pemodelan sistem, validasi *integral square error*, kontroler PID, dan kontroler *fuzzy*.

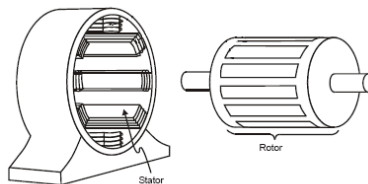
2.1 Motor Induksi Tiga Fasa [1]

Motor induksi tiga fasa konstruksinya sangatlah sederhana, jika dibandingkan dengan motor DC. Motor induksi memiliki konstruksi yang sangat kuat dan karakteristik kerja yang baik serta jenis motor AC yang paling banyak digunakan. Motor induksi memiliki konstruksi yang terdiri dari stator merupakan bagian yang diam dan rotor sebagai bagian yang berputar.

Pada dasarnya motor induksi tiga fasa berputar dengan kecepatan yang konstan, mulai dari kondisi tak berbeban sampai kondisi berbeban. Akan tetapi kecepatan putaran motor ini dipengaruhi oleh frekuensi, sehingga pengaturan kecepatannya tidak mudah dilakukan.

2.1.1 Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi tiga fasa memiliki konstruksi yang hampir sama dengan motor listrik jenis lainnya. Motor ini memiliki dua bagian utama, yaitu stator yang merupakan bagian yang diam, dan rotor sebagai bagian yang berputar sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2.1. Antara bagian stator dan rotor dipisahkan oleh celah udara yang sempit, dengan jarak yang hanya berkisar dari 0,4 mm sampai 4 mm.



Gambar 2.1. Penampang Stator dan Rotor Motor Induksi Tiga Fasa

2.1.1.1. Stator

Stator terdiri atas tumpukan laminasi inti yang memiliki alur yang menjadi tempat kumparan dililitkan yang berbentuk silindris. Alur pada tumpukan laminasi inti diisolasi dengan kertas (Gambar 2.2.b)). Tiap elemen laminasi inti dibentuk dari lempengan besi (Gambar 2.2.a)). Tiap lempengan besi tersebut memiliki beberapa alur dan beberapa lubang pengikat untuk menyatukan inti. Tiap kumparan tersebar dalam alur yang disebut belitan fasa dimana untuk motor tiga fasa, belitan tersebut terpisah secara listrik sebesar 120^0 . Kawat kumparan yang digunakan terbuat dari tembaga yang dilapis dengan isolasi tipis. Kemudian tumpukan inti dan belitan stator diletakkan dalam cangkang silindris (Gambar 2.2.c)). Berikut ini contoh lempengan laminasi inti, lempengan inti yang telah disatukan, belitan stator yang telah dilekatkan pada cangkang luar untuk motor induksi tiga fasa.



a) Lempengan Inti b) Lempengan Inti dan Kertas Isolasi c) Lempengan Inti dan Belitan stator

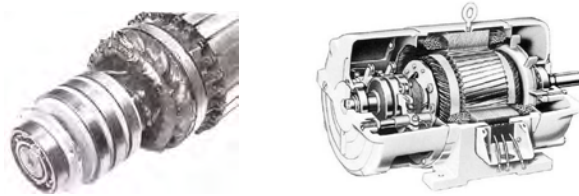
Gambar 2.2. Komponen Stator Motor Induksi Tiga Fasa

2.1.1.2. Rotor

Berdasarkan jenis rotornya, motor induksi tiga fasa dapat dibedakan menjadi dua jenis, yang juga akan menjadi penamaan untuk motor tersebut, yaitu rotor belitan (*wound rotor*) dan rotor sangkar tupai (*squirrel cage rotor*).

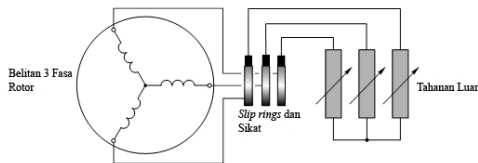
Jenis rotor belitan terdiri dari satu set lengkap belitan tiga fasa yang merupakan bayangan dari belitan pada statornya. Belitan tiga fasa pada rotor belitan biasanya terhubung Y, dan masing-masing ujung dari tiga kawat belitan fasa rotor tersebut dihubungkan pada *slip ring* yang terdapat pada poros rotor (Gambar 2.3.a)). Belitan-belitan rotor ini kemudian dihubungkan singkatkan melalui sikat (*brush*) yang menempel

pada *slip ring* (perhatikan Gambar 2.4), dengan menggunakan sebuah perpanjangan kawat untuk tahanan luar.



- a) Tampilan *Close-Up* Bagian *Slip Ring* Rotor Belitan
- b) Motor Induksi Tiga Fasa Rotor Belitan

Gambar 2.3. Konstruksi Rotor Belitan Motor Induksi Tiga Fasa

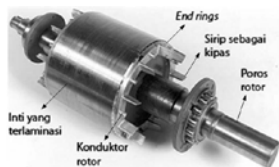


Gambar 2.4. Skematik Diagram Motor Induksi Rotor Belitan

Dari Gambar 2.4. dapat dilihat bahwa semata-mata keberadaan *slip ring* dan sikat hanyalah sebagai penghubung belitan rotor ke tahanan luar (*external resistance*). Keberadaan tahanan luar disini berfungsi pada saat pengasutan yang berguna untuk membatasi arus mula yang besar. Tahanan luar ini kemudian secara perlahan dikurangi sampai resistansinya nol sebagaimana kecepatan motor bertambah mencapai kecepatan nominalnya. Ketika motor telah mencapai kecepatan nominalnya, maka tiga buah sikat akan terhubung singkat tanpa tahanan luar sehingga rotor belitan akan bekerja seperti halnya rotor sangkar tupai.

Rotor sangkar mempunyai kumparan yang terdiri atas beberapa batang konduktor yang disusun sedemikian rupa hingga menyerupai sangkar tupai. Rotor terdiri dari tumpukan lempengan besi tipis yang dilaminasi dan batang konduktor yang mengitarinya (perhatikan Gambar 2.5.a)). Tumpukan besi yang dilaminasi disatukan untuk membentuk inti

rotor. Aluminium (sebagai batang konduktor) dimasukan ke dalam slot dari inti rotor untuk membentuk serangkaian konduktor yang mengelilingi inti rotor. Rotor yang terdiri dari sederetan batang-batang konduktor yang terletak pada alur-alur sekitar permukaan rotor, ujung-ujungnya dihubungkan singkat dengan menggunakan cincin hubung singkat (*shorting ring*) atau disebut juga dengan *end ring*.



a) Rotor Sangkar Tupai dan Bagian-Bagiannya

b) Motor Induksi Tiga Fasa Rotor Sangkar Tupai

Gambar 2.5. Motor Induksi Tiga Fasa Rotor Sangkar Tupai

2.1.2 Prinsip Kerja Motor Induksi

Dalam motor DC, arus ditarik dari catu tegangan dan diteruskan ke konduktor jangkar melalui sikat-sikat dan komutator. Jika konduktor jangkar mengalirkan arus dalam medan magnetik yang dihasilkan oleh rangkaian medan, maka konduktor dikenai gaya yang berusaha menggerakkannya dalam arah tegak lurus medan.

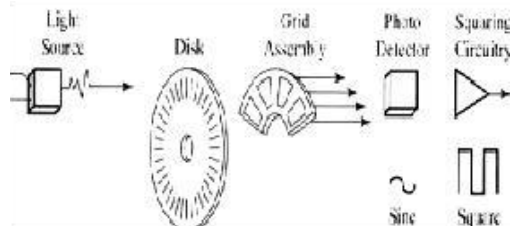
Dalam motor induksi, tidak ada hubungan listrik ke rotor, arus rotor merupakan arus induksi. Tetapi ada kondisi yang sama seperti dalam motor DC, yaitu konduktor rotor mengalirkan arus dalam medan magnetik sehingga terjadi gaya padanya yang berusaha menggerakkannya dalam arah tegak lurus medan.

Jika lilitan stator diberi energi dari catu tiga fasa, dibangkitkan medan magnetik putar yang berputar pada kecepatan sinkron. Ketika medan melewati medan konduktor rotor, dalam konduktor ini diinduksikan ggl yang sama seperti ggl yang diinduksikan dalam lilitan sekunder transformator oleh fluks arus primer. Rangkaian rotor adalah lengkap, baik melalui cincin ujung atau tahanan luar, ggl induksi menyebabkan arus mengalir dalam konduktor rotor. Jadi konduktor rotor yang mengalirkan arus dalam medan stator mempunyai gaya yang bekerja padanya.

2.2 Sensor Kecepatan *Rotary Encoder* [2]

Rotary encoder adalah divais elektromekanik yang dapat memonitor gerakan dan posisi. *Rotary encoder* umumnya menggunakan sensor optik untuk menghasilkan serial pulsa yang dapat diartikan menjadi gerakan, posisi, dan arah. Sehingga posisi sudut suatu poros benda berputar dapat diolah menjadi informasi berupa kode digital oleh *rotary encoder* untuk diteruskan ke rangkaian kendali.

Rotary encoder tersusun dari suatu piringan tipis yang memiliki lubang-lubang pada bagian lingkaran piringan. LED ditempatkan pada salah satu sisi piringan sehingga cahaya menuju ke piringan. Di sisi yang lain suatu *photo-transistor* diletakkan sehingga *photo-transistor* ini dapat mendeteksi cahaya dari LED yang berseberangan. Piringan tipis tadi dikopel dengan poros motor, atau divais berputar lainnya yang ingin kita ketahui posisinya, sehingga ketika motor berputar piringan juga ikut berputar. Apabila posisi piringan mengakibatkan cahaya dari LED dapat mencapai *photo-transistor* melalui lubang-lubang yang ada, maka *photo-transistor* mengalami saturasi dan akan menghasilkan suatu pulsa gelombang persegi. Gambar 2.6 menunjukkan bagan skematik sederhana dari *rotary encoder*. Semakin banyak deretan pulsa yang dihasilkan pada satu putaran menentukan akurasi *rotary encoder* tersebut, akibatnya semakin banyak jumlah lubang yang dapat dibuat pada piringan menentukan akurasi *rotary encoder* tersebut.



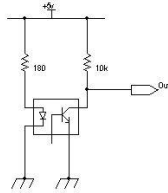
Gambar 2.6 Blok Penyusun *Rotary Encoder*

Rangkaian penghasil pulsa (Gambar 2.7) yang digunakan umumnya memiliki *output* yang berubah dari +5V menjadi 0.5V ketika cahaya diblok oleh piringan dan ketika diteruskan ke *photo-transistor*. Karena divais ini umumnya bekerja dekat dengan motor AC maka banyak noise yang timbul sehingga biasanya *output* akan dimasukkan ke *low-pass filter* dahulu. Apabila *low-pass filter* digunakan, frekuensi *cut-off* yang dipakai umumnya ditentukan oleh jumlah slot yang ada pada

piringan dan seberapa cepat piringan tersebut berputar, dinyatakan dengan:

$$f_c = \frac{s_w n}{60} \quad (2.1)$$

Dimana f_c adalah frekuensi *cut-off filter*, s_w adalah kecepatan piringan dan n adalah jumlah slot pada piringan.



Gambar 2.7 Rangkaian Tipikal Penghasil Pulsa pada *Rotary Encoder*

2.3 Rem Elektromagnetik [3]

Rem merupakan suatu alat yang digunakan untuk mengurangi kecepatan suatu benda yang bergerak. Pada umumnya rem yang digunakan adalah rem yang menggunakan gaya gesek untuk memberikan gaya lawan terhadap gaya gerak. Sedangkan untuk rem elektromagnetik menggunakan gaya elektromagnetik untuk memperlambat suatu gerakan. Sebuah piringan dengan bahan logam non-feromagnetik dikopel dengan poros yang berputar. Piringan tersebut diapit oleh sisi stator berupa sistem lilitan elektromagnetik yang dapat membangkitkan medan magnet dari aliran listrik.

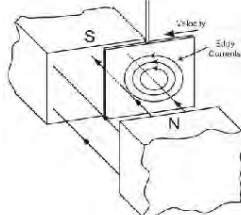
Bila dialiri arus listrik maka akan menimbulkan medan magnet pada lilitan dan logam piringan yang memotong medan magnet tersebut akan menimbulkan arus *eddy* pada piringan itu sendiri. Arus *eddy* ini akan menimbulkan medan magnet yang arahnya berlawanan dengan medan magnet sebelumnya, sehingga menghambat gerakan putar dari poros tersebut. Rem elektromagnetik tidak akan sampai memberhentikan sistem secara mendadak, tetapi hanya bisa menurunkan kecepatan dari sistem yang dikasih pengereman. Sehingga Rem ini sering diaplikasikan untuk sistem pengereman pada *roller coaster*, kereta api, dan juga digunakan pada alat *dinamometer* untuk pengukuran torsi suatu mesin. Untuk gambar fisik dari rem elektromagnetik ditunjukkan oleh Gambar 2.8. Arus *eddy* yang melingkar menyebabkan medan magnet induksi melawan arah medan magnet mula-mula. Hal ini

menyebabkan gaya pengereman yang melawan arah kecepatan konduktor yang bergerak memotong medan magnet dari kedua solenoid.



Gambar 2.8 Contoh Bentuk Fisik Rem Elektromagnetik

Gaya pengereman yang dihasilkan oleh arus melingkar *eddy* ditunjukkan oleh Gambar 2.9. Medan magnet yang arahnya menjauhi pengamat. Kemudian sebuah konduktor memotong medan magnet tersebut dengan kecepatan (besar dan arah) tertentu. Berdasarkan Hukum Faraday, apabila terjadi perubahan medan magnet, maka akan timbul ggl pada konduktor. Pada konduktor, bidang yang mengalami perubahan *fluks* magnet hanya pada kedua sisinya, yang pertama adalah saat keluar dari medan magnet (*fluks* magnet yang lewat pada konduktor berkurang) dan yang kedua adalah saat memasuki medan magnet (*fluks* magnet yang melewati konduktor bertambah). Sedangkan bagian tengah konduktor tidak mengalami perubahan *fluks* magnet sehingga tidak timbul lagi. Dengan artian, gaya lawan hanya dihasilkan apabila permukaan tersebut memiliki kecepatan. Semakin tinggi kecepatan maka gaya lawan yang dihasilkan juga semakin besar. Namun semakin rendah kecepatan, maka gaya lawan akan semakin kecil.



Gambar 2.9 Gaya Pengereman Arus *Eddy*

2.4 Inverter Siemens Micromaster 420 [4]

Inverter yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah Siemens micromaster 420, yaitu *inverter* pengendali frekuensi untuk putar balik

motor AC tiga fasa. *Inverter* ini adalah sebuah *mikroprocessor* pengontrol yang menggunakan teknologi *Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)* yang membuatnya lebih memiliki kegunaan dan keandalan. Bentuk fisik *inverter* Siemens Micromaster 420 dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Bentuk Fisik *Inverter* Siemens Micromaster 420

Micromaster 420 memiliki 2 pilihan *mode* operator panel, yaitu:

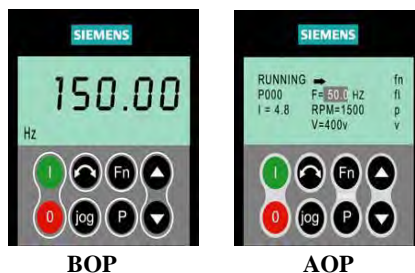
1. *Basic Operator Panel (BOP)*

Pada *mode* BOP yang ditampilkan hanya berupa informasi frekuensi (Hz),

2. *Advanced Operator Panel (AOP)*

Pada *mode* AOP informasi yang ditampilkan lebih beragam.












Jadi perbedaan BOP dan AOP terletak pada cara men-*setting* parameter dan informasi yang ditampilkan LCD. Pada pugas akhir ini, *inverter* Micromaster 420 digunakan dalam *mode* BOP. Perbedaan tampilan BOP dan AOP dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Operator Panel BOP dan AOP

Terdapat beberapa tombol yang memiliki fungsi berbeda untuk pengoperasian *inverter* Siement Micromaster 420. Beberapa tombol tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.1

Table 2.1 Fungsi Tombol *Inverter* Micromaster 420

Panel/Button	Fungsi	Keterangan
	Status Indikasi	Tampilan LCD saat akan memilih parameter yang akan di- <i>setting</i>
	<i>Start Motor</i>	Tombol untuk menjalankan motor
	<i>Stop Motor</i>	Tombol untuk memberhentikan motor
	<i>Change Direction</i>	Tombol untuk mengubah arah putaran motor
	<i>Jog Motor</i>	Tombol untuk menjalankan motor sesuai <i>joging present</i> . Motor akan berjalan selama tombol ditahan
	<i>Functions</i>	Tombol untuk menampilkan informasi tambahan. Tombol ini
	<i>Access Parameter</i>	Tombol untuk mengakses parameter
	<i>Increase Value</i>	Tombol untuk menaikkan nilai yang ditampilkan
	<i>Decrease Value</i>	Tombol untuk menurunkan nilai yang ditampilkan
 	<i>AOP menu</i>	Kombinasi tombol ini digunakan untuk masuk ke <i>mode</i> AOP

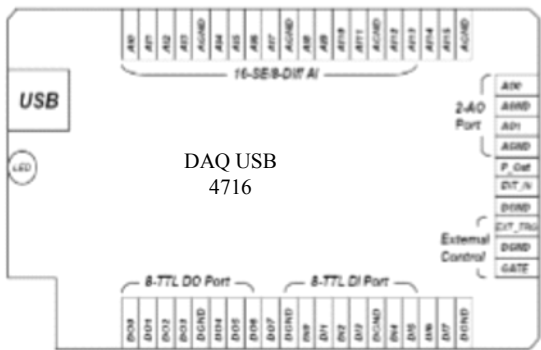
2.5 *Data Acquisition System (DAQ) USB 4716 Advantech [5]*

DAQ merupakan suatu proses pengambilan data yang mengukur fenomena fisik atau elektrik kemudian mengubahnya ke dalam nilai digital yang dapat disimulasi dengan menggunakan komputer.

Untuk spesifikasi lengkap tentang DAQ USB 4716 Advantech ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Spesifikasi DAQ USB 4716 Advantech

Analog Input	Channels	16 SE/8 Diff
	Sampling Rates	200 kS/s
	Resolution	16 bits
	Unipolar Input (V)	0 ~ 10, 0 ~ 5, 0 ~ 2.5, 0 ~ 1.25
	Bipolar Inputs (V)	±10, ±5, ±2.5, ±1.25, ±0.625
Analog Output	Resolution	16 bits
General	Power Consumption	Typical: 5V @ 360 mA; Max.: 5 V @ 450 mA
	I/O Connectors	Onboard screw terminal
	Dimensions	132 x 80 x 32 mm (5.2" x 3.15" x 1.26")
	Bus	USB 2.0
Timer/Counter	Resolution	32 bits
	Time Base	1 kHz
	Channels	1
TTL DI/O	Input Channels	8
	Output Channels	8



Gambar 2.12 Bagian-Bagian dari DAQ USB 4716 Advantech

DAQ USB 4716 di desain memiliki 16 analog input, 8 channel digital input, 8 channel digital output, 2 analog output, dan sebuah

channel counter 32-bit. Koneksi dengan komputer menggunakan USB yang sekaligus digunakan sebagai power untuk DAQ. Gambar 2.12 merupakan bagian-bagian dari DAQ USB 4716 A dvantech. Dan Gambar 2.13 bentuk fisik dari DAQ USB 4716.



Gambar 2.13 Bentuk Fisik DAQ USB 4716

2.6 Pemodelan Sistem

Pemodelan sistem adalah suatu proses untuk mendapatkan model matematis yang merepresentasikan keadaan sistem. Pada umumnya identifikasi dibagi menjadi dua berdasarkan cara untuk mendapatkannya yaitu identifikasi statis dan identifikasi dinamis. Pada tugas akhir ini digunakan identifikasi secara dinamis.

Identifikasi sistem merupakan suatu pemodelan matematika terhadap suatu sistem atau proses berdasarkan data-data hasil percobaan. Identifikasi dinamis diawali dengan memberikan sinyal uji terhadap sistem. Sinyal uji yang digunakan adalah *Pseudo Random Binary Sequence* (PRBS). PRBS merupakan sinyal kotak yang termodulasi pada lebarnya dan berlangsung secara sekuensial. [6]

Respon dari *plant* berupa pembacaan kecepatan dari motor induksi. Data masukan dan keluaran dari sistem disimpan untuk diolah pada proses berikutnya. Untuk proses identifikasi berikutnya yaitu pemilihan struktur model dan estimasi parameter akan dilakukan pada *software* Matlab menggunakan *System Identification Tools*.

2.7 Validasi Sistem [7]

Dalam melakukan pendekatan model matematis diperlukan perhitungan kesalahan sistem. Tolok ukur telah didapatkan model matematis yang paling sesuai dengan *plant* adalah dengan mengetahui

nilai kesalahan antara nilai keluaran model yang didapat dengan nilai pada data aktual hasil identifikasi sistem. Ukuran kesalahan ini disebut *error* sedangkan proses perhitungan *error* ini disebut sebagai *Integral Square Error* atau ISE, dimana rumus ISE dapat dilihat pada Persamaan 2.2.

$$ISE = \int_0^t e(t)^2 dt \quad (2.2)$$

dimana e adalah hasil pengurangan dari data hasil pemodelan dan data hasil pengukuran terhadap waktu. Nilai e tersebut kemudian dikuadratkan dan dijumlahkan sesuai dengan banyaknya data terhadap waktu. Hasil perhitungan ISE menunjukkan seberapa baik fungsi alih merepresentasikan respon hasil pengukuran. Semakin kecil nilai ISE, semakin baik model matematis yang dibuat.

2.8 Kontroler PID [8]

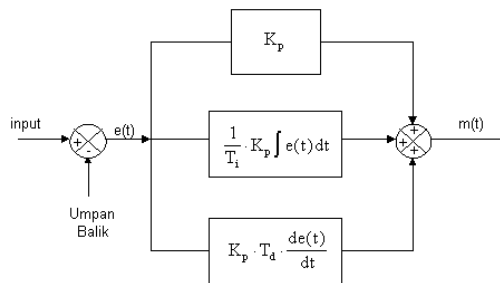
Kontroler adalah komponen yang berfungsi untuk mengurangi sinyal kesalahan. Keberadaan kontroler atau pengendali dalam sebuah sistem kontrol mempunyai kontribusi yang besar terhadap perilaku sistem. Pada prinsipnya hal itu disebabkan oleh model *plant* yang diasumsikan tidak dapat diubah, sehingga untuk mengubah karakteristik dan kinerja sistem secara keseluruhan seperti yang diinginkan, diperlukanlah suatu pengendali. Pengendali inilah yang modelnya dapat diubah, sehingga model sistem seluruhnya juga berubah sesuai yang dikehendaki.

Selain itu, salah satu tugas komponen kontroler adalah mereduksi sinyal kesalahan, yaitu perbedaan antara sinyal yang diberikan dan sinyal aktual yang dibandingkan melalui umpan balik. Kontroler akan senantiasa mengubah sinyal aksi selama sinyal *error* terjadi. Hal ini sesuai dengan tujuan sistem kontrol yakni untuk mendapatkan sinyal aktual yang senantiasa diinginkan sama dengan sinyal acuan yang diatur. Dengan demikian semakin cepat reaksi sistem mengikuti sinyal aktual dan semakin kecil kesalahan yang terjadi, semakin baiklah kinerja sistem kontrol yang diterapkan.

Tipe kontroler yang paling populer ialah kontroler PID. Elemen-elemen kontroler P, I dan D masing - masing secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem, menghilangkan *offset* dan menghasilkan perubahan awal yang besar.

Pengendali *Proportional Integral Derivative* (PID) merupakan salah satu pengendali yang bertujuan memperbaiki kinerja suatu sistem, termasuk sistem kendali putaran motor induksi tiga fasa. Kecepatan respon dan *error steady state* merupakan parameter yang diukur untuk menilai kinerja suatu sistem kendali. Kondisi terbaik dengan metode *tunning* Ziegler Nichols diperoleh pada nilai dengan *error steady state* maksimal sebesar 2%.

Apabila terdapat perbedaan antara nilai *setting* dengan nilai keluaran maka kontroler akan menghasilkan sinyal *error* yang berfungsi mempengaruhi aksi kendali pada *plant*. Dengan demikian sistem secara cepat mengubah keluaran *plant* sampai diperoleh selisih antara sinyal *setting* dengan keluaran sistem yang diatur sekecil mungkin. Kendali yang diaplikasikan pada sistem pengaturan putaran motor pada laporan ini adalah kendali PID. Secara umum, blok diagram kontroler PID yang digunakan, terlihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Blok Kontroler PID

Sesuai dengan penamaannya, sistem kontrol PID merupakan gabungan metode pengaturan yang terdiri dari kendali *proporsional*, *integral*, dan *derivative* yang masing-masing memiliki kegunaan, seperti yang tertera pada Tabel 2.3 berikut:

Table 2.3. Kinerja Kendali PID

Respon Close Loop	Rise Time	Overshoot	Error Steady State
<i>Proporsional</i>	Berkurang	Meningkat	Berkurang
<i>Integral</i>	Berkurang	Meningkat	Hampir nol
<i>Derivative</i>	Berubah sedikit	Berkurang	Berubah sedikit

Masing-masing kendali dapat bekerja dan diimplementasikan baik secara terpisah maupun kombinasi secara bersamaan dengan tujuan saling melengkapi diantara masing-masing karakteristik kendali tersebut. Penjelasan untuk masing - masing kendali, berikut ini:

1. Pada aksi kendali proporsional, keluaran sistem kendali akan berbanding lurus dengan masukan dan *error*, dan menghasilkan tanggapan yang cepat. Akan tetapi *overshoot* meningkat sehingga sistem cukup bermasalah terutama saat awal beroperasi.
2. Untuk kendali integral, keluaran sistem berubah dengan cepat sesuai perubahan *error*, sehingga *error steady state* mendekati nol.
3. Sedangkan aksi kendali derivative bekerja sesuai dengan laju perubahan *error*. Oleh karena itu, kendali ini berfungsi mereduksi laju perubahan *error* sehingga menjaga kestabilan sistem. Dalam perancangan sistem kontrol PID yang perlu dilakukan adalah mengatur parameter Kp, Ki dan Kd supaya tanggapan keluaran sistem sesuai yang diinginkan.

Langkah-langkah yang bisa dilakukan untuk mendesain kendali PID sehingga mendapatkan respon yang diinginkan, sebagai berikut: Mengamati respon sistem *open loop* untuk menentukan parameter kinerja yang akan diperbaiki, kemudian dianalisa kestabilan sistem dengan menggunakan metode Ziegler Nichols, menambahkan kendali proporsional untuk memperbaiki *rise time*, menambahkan kendali *derivative* untuk mengurangi *overshoot*, menambahkan kendali integral untuk mengurangi *error steady state*, yang terakhir mengubah-ubah parameter Kp, Ki dan Kd sehingga diperoleh kinerja yang diinginkan. Fungsi transfer kontroler PID dalam domain s dinyatakan dengan persamaan :

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.3)$$

Keterangan :

Kp = penguatan proporsional

Ki = penguatan integral

Kd = penguatan derivatif

Ti = waktu integral

Td = waktu derivatif

2.9 Logika Fuzzy [9]

Secara umum logika *fuzzy* adalah sebuah metodologi berhitung dengan variabel kata-kata (*linguistic variable*), sebagai pengganti teori logika benar atau salah. Logika *fuzzy* diperkenalkan pertama kali oleh Prof. Lotfi Zadeh pada tahun 1965. Kata-kata yang digunakan dalam logika *fuzzy* lebih dekat dengan penalaran intuisi manusia sehingga sebuah nilai bisa bernilai benar dan salah secara bersamaan karena besar nilai kebenaran dan kesalahan suatu nilai bergantung kepada derajat keanggotaan tiap elemennya. Sehingga logika *fuzzy* memberikan ruang dan bahkan mengeksplorasi toleransi terhadap ketidakpresisian (*imprecision*). Logika *fuzzy* telah menjadi area riset yang mengagumkan karena kemampuannya dalam menjembatani bahasa mesin yang serba presisi dengan bahasa manusia yang cenderung tidak presisi, yaitu yang menekankan pada makna atau arti (*significance*). Dengan logika *fuzzy*, sistem kepakaran manusia bisa diimplementasikan kedalam bahasa mesin secara mudah.

2.9.1. Himpunan Fuzzy

Pada himpunan tegas (*crisp*), nilai keanggotaan suatu item x dalam suatu himpunan A , yang sering ditulis dengan $\mu_A(x)$, memiliki dua kemungkinan, yaitu 0 atau 1, sedangkan pada himpunan *fuzzy* nilai keanggotaan terletak pada rentang 0 sampai 1 yang menyatakan derajat keanggotaan masing-masing elemen dalam suatu himpunan. Himpunan *fuzzy* merupakan cara untuk menerjemakan tentang ke-*fuzzy*-an ke dalam suatu bentuk fungsi keanggotaan (*membership function*). Fungsi keanggotaan ini dideskripsikan melalui bahasa natural (*ambiguity, impreciseness, uncertainty*). Misal Z adalah semesta pembicaraan dengan z merupakan elemen dari Z . Himpunan *fuzzy* F , $F \subseteq Z$ didefinisikan sebagai kumpulan elemen atau objek $z \in Z$ di mana setiap elemen z memiliki derajat keanggotaannya masing-masing untuk menjadi anggota himpunan F . Secara matematis, himpunan *fuzzy* F dalam Z dinyatakan:

$$F = \{(z, \mu_F(z)) | z \in Z\} \quad (2.4)$$

dengan $\mu_F(z)$ adalah fungsi keanggotaan untuk himpunan *fuzzy* F . Fungsi keanggotaan memetakan pada tiap-tiap elemen z ke derajat keanggotaan antara 0 sampai 1. Himpunan *fuzzy* memiliki 2 atribut, yaitu:

- a. Linguistik, yaitu penamaan suatu grup yang mewakili suatu keadaan atau kondisi tertentu dengan menggunakan bahasa alami, seperti agak kering, sedang, sangat kering.
- b. Numeris, yaitu suatu nilai (angka) yang menunjukkan ukuran dari suatu variabel seperti: 500, 750, 1000.

2.9.2. Fungsi Keanggotaan

Fungsi keanggotaan (*membership function*) adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik *input* data kedalam nilai keanggotaanya (derajat keanggotaan) yang memiliki interval antara 0 sampai 1. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai keanggotaan adalah dengan melalui pendekatan fungsi, ada beberapa fungsi yang bisa digunakan.

A. Representasi Kurva Segitiga

Kurva segitiga merupakan gabungan antara 2 garis linear. Fungsi keanggotaan segitiga ditentukan oleh tiga parameter $\{a, b, c\}$ dengan $a < b < c$ sesuai dengan Persamaan 2.5.

Ketiga parameter tersebut menyatakan titik-titik *input* x untuk sudut segitiga. Gambar 2.15(a) merupakan contoh fungsi keanggotaan segitiga dengan parameter $a = 200$, $b = 500$ dan $c = 800$.

$$\mu_{\text{segitiga}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (2.5)$$

B. Representasi Kurva Gaussian

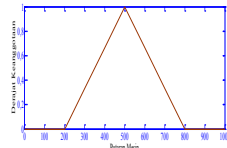
Fungsi keanggotaan *gaussian* ditentukan oleh dua parameter $\{c, \sigma\}$ sesuai dengan Persamaan 2.6 yang menentukan nilai domain pada pusat kurva dan lebar kurva. Gambar 2.15.b) menunjukkan fungsi keanggotaan *gaussian* dengan parameter $\{100, 500\}$.

$$\mu_{\text{gaussian}}(x) = e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-c}{\sigma})^2} \quad (2.6)$$

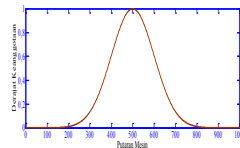
C. Representasi Kurva Trapesium

Fungsi keanggotaan trapesium pada dasarnya sama seperti bentuk segitiga, hanya saja ada beberapa titik memiliki nilai keanggotaan 1, dinyatakan dengan empat parameter $\{a, b, c, d\}$ dengan $a < b < c < d$. Keempat parameter tersebut menyatakan letak titik-titik *input* x untuk sudut trapesium. Fungsi keanggotaan trapesium dapat dilihat pada Persamaan 2.7. Pada Gambar 2.15c) ditunjukkan bentuk fungsi keanggotaan trapesium dengan parameter $\{200, 400, 700, 800\}$.

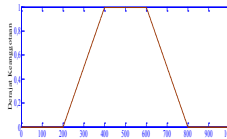
$$\mu_{\text{trapesium}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{c-x}{c-b}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (2.7)$$



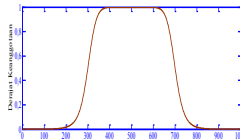
a) Segitiga



b) Gaussian



c) Trapezium



d) Generalized Bell

Gambar 2.15 Bentuk-Bentuk Fungsi keanggotaan.

D. Representasi Kurva *Generalized Bell*

Fungsi keanggotaan *generalized bell* ditentukan oleh tiga parameter $\{a, b, c\}$ sesuai dengan Persamaan 2.8 dengan parameter b bernilai positif. Parameter c merupakan pusat domain yang menentukan letak x yang memiliki derajat keanggotaan yang

bernilai satu. Fungsi keanggotaan dari *generalized bell* dengan parameter $\{200,5,500\}$ ditunjukkan pada Gambar 2.15d)

$$\mu_{Generalized\ Bell}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (2.8)$$

2.9.3. Operasi Himpunan Fuzzy

Seperti halnya himpunan konvensional, ada beberapa operasi yang didefinisikan secara khusus untuk mengkombinasi dan memodifikasi himpunan fuzzy. Terdapat tiga operator dasar fuzzy antara lain yaitu operasi interseksi (*AND*), *Union* (*OR*), Komplemen (*NOT*). Misal terdapat himpunan fuzzy A dan B dari semesta pembicaraan X dengan fungsi keanggotaan masing-masing μ_A dan μ_B untuk setiap $x \in X$. Himpunan fuzzy A merupakan fungsi keanggotaan Segitiga dengan parameter $\{100,400,700\}$, dan himpunan fuzzy B merupakan fungsi keanggotaan trapesium dengan parameter $\{400,600,800,900\}$.

Berikut akan dijelaskan mengenai penggunaan beberapa operasi pada himpunan fuzzy.

1. Interseksi (*AND*)

Interseksi dari himpunan fuzzy A dan B merupakan himpunan fuzzy yang memiliki fungsi keanggotaan sebagai berikut.

a. Minimum

Jika menggunakan operator *minimum*, maka hasil operasi adalah nilai minimal antara μ_A dan μ_B yang dapat dinyatakan dengan

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \text{ untuk } x \in X \quad (2.9)$$

b. Algebraic Product

Operator *algebraic product* merupakan hasil kali dari μ_A dan μ_B , yang dapat dinyatakan dengan

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \mu_B(x) \text{ untuk } x \in X \quad (2.10)$$

2. Union (*OR*)

Union dari himpunan fuzzy A dan B merupakan himpunan fuzzy yang memiliki fungsi keanggotaan sebagai berikut.

a. Maximum

Jika menggunakan operator *maximum*, maka hasil operasi adalah nilai maksimal antara μ_A dan μ_B yang dapat dinyatakan dengan

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \text{ untuk } x \in X \quad (2.11)$$

b. *Algebraic Sum*

Operator *algebraic sum* merupakan fungsi penjumlahan dari μ_A dan μ_B dikurangi hasil kali dari μ_A dan μ_B , yang dinyatakan sebagai berikut:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\mu_B(x) \text{ untuk } x \in X \quad (2.12)$$

3. Komplemen (*NOT*)

Komplemen dari himpunan *fuzzy A* merupakan 1 dikurangi fungsi keanggotaan μ_A atau dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \text{ untuk } x \in X \quad (2.13)$$

2.9.4. Sistem Inferensi Fuzzy

Dengan melakukan inferensi *fuzzy* cara kerja dari sistem yang dinyatakan dalam *if-then rule*, dapat dipetakan suatu *input* menjadi *output* berdasarkan *if-then rule* yang diberikan, yang dinyatakan sebagai:

If premis ***then*** konsekuen

Mekanisme inferensi *fuzzy* adalah proses pengambilan keputusan dari masing-masing premis sesuai dengan aturan *fuzzy*. Pada Gambar 2.16 memperlihatkan bahwa terdapat 4 komponen dalam kontroler *fuzzy*, yaitu:

1. Basis aturan

Basis aturan merupakan pemetaan *input* tegas ke *output* dalam sistem *fuzzy* sesuai dengan variabel linguistik untuk mencapai hasil kontrol yang diinginkan.

2. Mekanisme inferensi

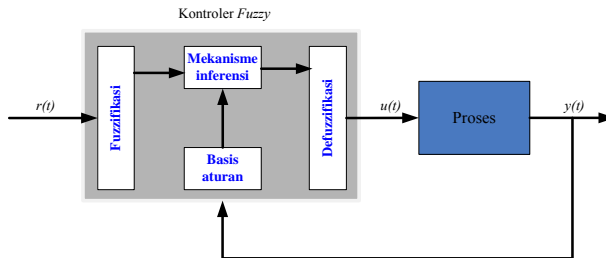
Merupakan interpretasi dan aplikasi pengetahuan untuk mengambil keputusan sesuai dengan basis aturan agar diperoleh cara pengontrolan *plant* yang terbaik.

3. Fuzifikasi

Merupakan proses mengubah *input* tegas menjadi informasi yang digunakan dalam mekanisme inferensi *fuzzy* untuk mengaktifkan dan menggunakan aturan sesuai dengan variabel linguistik.

4. Defuzifikasi

Merupakan proses mengubah *output fuzzy* menjadi *output* tegas untuk mendrive proses. Masukan defuzzifikasi adalah sebuah himpunan *fuzzy* hasil agregasi dan keluarannya adalah sebuah bilangan tunggal.



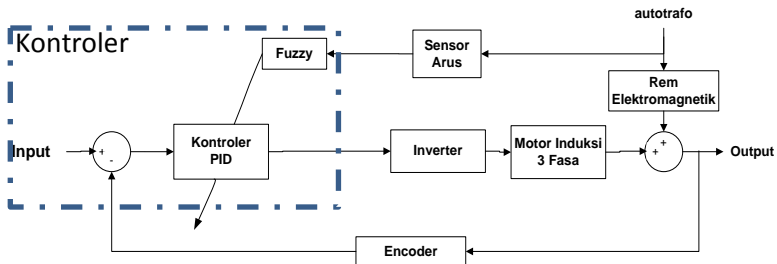
Gambar 2.16 Struktur Dasar Sistem Kontrol *Fuzzy*.

BAB III PERANCANGAN SISTEM

Bab ini membahas perancangan sistem secara keseluruhan yang dibagi menjadi 5 subbab yaitu gambaran umum sistem, perancangan perangkat keras, perancangan perangkat lunak, pemodelan sistem, dan perancangan kontroler *fuzzy*-PID.

3.1 Gambaran Umum Sistem

Dalam pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan menggunakan kontroler *fuzzy*-PID, dapat digambarkan pada diagram blok sistem yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.



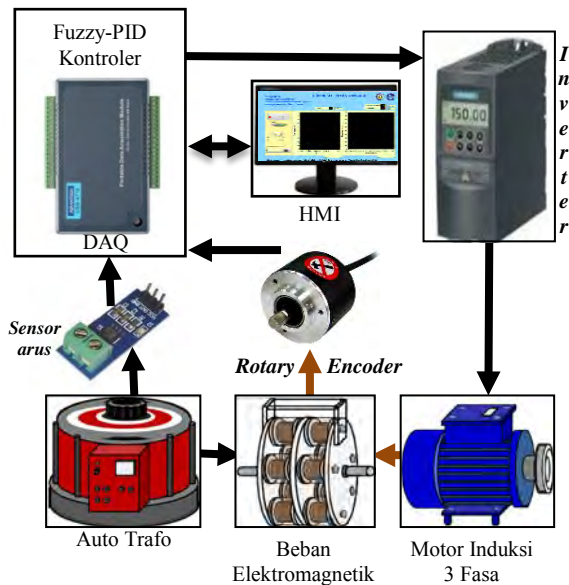
Gambar 3.1. Diagram Blok Sistem dengan Kontroler *Fuzzy*-PID

Berdasarkan diagram blok di atas dapat dijelaskan secara singkat sebagai berikut. Blok kontroler secara keseluruhan diwakili oleh DAQ USB 4716 produk dari Advantech dan Labview 2013 sebagai *software* penghubungnya. Subblok *fuzzy* yang melakukan *tunning* terhadap parameter PID dilakukan oleh DAQ Navi pada pin *analog input* 0, sedangkan untuk subblok PID berasal dari selisih antara sinyal *input* dari Labview dan hasil pembacaan *encoder* oleh DAQ Navi pada pin *evt_in* yang nantinya disebut dengan sinyal *error*. Sinyal *error* akan diolah oleh kontroler PID kemudian menghasilkan sinyal kontrol yang digunakan untuk mengontrol kecepatan motor induksi. Sinyal kontrol dihubungkan ke DAQ Navi pada pin *analog output* 1 dan dihubungkan ke *inverter*. Dari *inverter input* tegangan akan dikonversi ke frekuensi sehingga bisa mengatur cepat lambat motor induksi tiga fasa. Pada motor induksi juga dipasang rem elektromagnetik sebagai beban. Arus untuk *men-drive*

beban dihubungkan ke sensor arus untuk diumpankan sebagai masukan *fuzzy*.

3.2 Perancangan Perangkat Keras

Pada perancangan sistem digunakan perangkat keras mekanik dan perangkat keras elektronik. Oleh karena itu, diperlukan perancangan mekanik dan perancangan elektronik untuk mendukung sistem ini. Perancangan mekanik adalah perancangan komponen yang berhubungan dengan mesin dan kerja mesin, yaitu motor induksi tiga fasa, *encoder*, rem elektromagnetik, kotak panel. Perancangan elektronik adalah perancangan komponen yang berupa sensor, kontroler, *actuator* dan rangkaian lain dalam sistem. Gambar rancangan perangkat keras ditunjukkan pada Gambar 3.2.



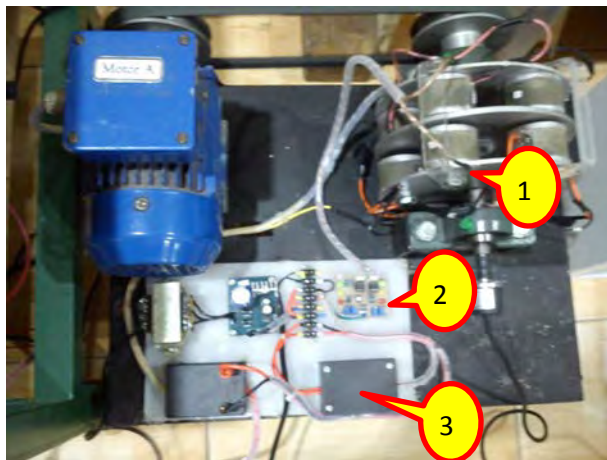
Gambar 3.2 Perancangan Perangkat Keras

HMI digunakan untuk memonitor kondisi *plant*. Kontroler *fuzzy*-PID diprogram di Labview+DAQ untuk memberikan sinyal kontrol yang berupa tegangan 0-10 VDC. Tegangan 0-10VDC tersebut oleh *inverter* akan diubah menjadi frekuensi sehingga dapat digunakan untuk

mengatur kecepatan putar motor induksi tiga fasa. Sensor *rotary encoder* berfungsi untuk mendeteksi kecepatan (dalam rpm) dengan cara mengkonversi jumlah pulsa yang dihasilkan dalam setiap putaran motor. *Output* sensor *rotary encoder* dapat langsung dibaca oleh pin *evt_in* (*Counter*) yang terdapat pada DAQ Advantech untuk diproses sebagai sinyal *feedback*. Sedangkan sensor arus digunakan untuk mendeteksi arus yang mengalir antara trafo dan beban, yang digunakan sebagai masukan untuk kontroler *fuzzy*.

3.2.1 Perancangan Mekanik

Plant yang dirancang dalam tugas akhir ini merupakan *plant* yang digunakan pada tugas akhir sebelumnya. Akan tetapi telah dimodifikasi dengan memberikan tambahan sensor temperatur sebagai indikator bilamana *plant* sudah panas maka harus dimatikan, sehingga pengaruh dari rem elektromagnetik lebih kelihatan perbedaannya. Selain itu juga ada penambahan sensor arus yang mengalir pada rem elektromagnetik untuk masukan pada kontroler *fuzzy* sebagai beban. Komponen utama dalam sistem ini adalah motor induksi tiga fasa yang akan diatur kecepatannya dan rem elektromagnetik sebagai komponen untuk pembebanan. Bentuk *plant* yang telah dimodifikasi secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Bentuk *Plant* Setelah Dimodifikasi

Pada Gambar 3.3. terdapat dua buah sensor tempratur yang dipasang pada piringan yang terletak antara rem elektromagnetik(nomer 1) dan sepasang LED hijau yang menandakan sensor tempratur *On* dan berada pada tempratur dingin, sepasang LED kuning yang menandakan *plant* mulai panas tapi masih dalam kondisi wajar untuk beroperasi, dan sepasang LED merah yang mengharuskan untuk mematikan sistem(nomer 2). Sedangkan untuk memonitoring arus yang masuk pada rem elektromagnetik dipasang sensor arus (nomer 3), sensor arus ini digunakan sebagai masukan dari kontroler *fuzzy*.

3.2.1.1 Motor Induksi Tiga Fasa

Motor yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah motor induksi tiga fasa merek *Alliance* buatan Italy dengan spesifikasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.1. Sedangkan bentuk fisik motor induksi tiga fasa yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.4.

Tabel 3.1 Spesifikasi Motor Induksi Tiga Fasa

Alliance-Italy		IEC 34 – CE
TYPE AY 638 -4		N0. 02030688
0,18 KW	0,25 HP	1,07/0,62 A
220/380 V	1310 rpm	LW 52 dB(A)
CONN. Δ/Y	PROT GRADE IP 55	50 Hz 4,7 kG
JB /T8680, 1-1998	Work Rule S1	INS. CLASS F DATE 02

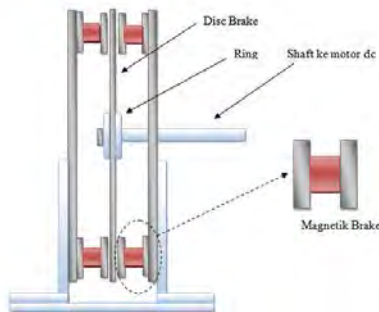
Spesifikasi atau plat motor berisikan identitas motor yang berupa tipe, nomor seri, dan tahun produksi. Spesifikasi mekanis dan elektrik juga ditunjukkan pada plat motor. Pada plat dijelaskan bahwa motor ini memiliki daya sebesar 0,18 KW / 0,25 HP dengan nilai kecepatan maksimum berkisar 1310 rpm. Motor dapat dikoneksikan secara *Delta* atau *Star*. Koneksi Delta membutuhkan tegangan *supply* sebesar 220 V dan menghasilkan arus nominal 1,07 A. Koneksi *start* akan membutuhkan tegangan *supply* sebesar 380 V dan menghasilkan arus nominal sebesar 0,62 A. Pada tugas akhir ini memakai koneksi *star*. Motor ini bekerja dengan frekuensi kerja sebesar 50 Hz.



Gambar 3.4 Motor Induksi Tiga Fasa yang Digunakan

3.2.1.2 Rem Elektromagnetik [3]

Pada pengaturan kecepatan motor induksi, komponen ini digunakan sebagai beban. Gaya yang dihasilkan oleh rem elektromagnetik didapat ketika piringan rem diletakkan pada poros yang berputar dan dialiri arus listrik yang akan menghasilkan gaya yang berlawanan arah dengan arah putaran poros. Gaya yang berlawanan ini akan menyebabkan putaran dari motor berkurang. Oleh karena itu rem elektromagnetik ini bisa disebut sebagai beban. Dengan memperbesar *input* tegangan pada rem elektromagnetik ini dapat memberikan pengereman pada poros. Konstruksi rem elektromagnetik terdiri dari dua piringan besi yang diberi konduktor berupa kumparan yang dililit seperti Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Konstruksi Rem Elektromagnetik

Rem elektromagnetik yang digunakan tetap seperti yang dikerjakan pada tugas akhir sebelumnya, yaitu terdiri dari 10 kumparan

yang disusun secara seri, dan dipisahkan menjadi dua bagian dengan diberikan celah atau ruang kosong diantaranya. Pada celah atau ruang kosong ini diberikan suatu piringan besi yang terhubung dengan poros motor induksi.

3.2.1.3 Sensor Rotary Encoder

Sensor *rotary encoder* yang digunakan dalam tugas akhir ini produk dari Autonics dengan tipe E30S4-100-3-N-5 yang berfungsi untuk membaca kecepatan putar. Sensor ini memiliki resolusi sebesar 100 P/R (*Pulse/Rotation*) dan memiliki 3 *output phase* yaitu *channel A*, *channel B* dan *Z*. Dimensi dan spesifikasi elektris dari *rotary encoder* lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.6 dan Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Spesifikasi *Rotary Encoder* Autonics E30S4-100-3-N-5 [11]

Metode Encoder	Incremental
Tegangan Supply	5 V DC (<i>ripple</i> (p-p): maksimal 5%)
Konsumsi Arus	20 mA DC (maksimal)
Resolusi	100 P/R (<i>Pulse/Rotation</i>)
Output Phase	A, B, Z
Control output (<i>Output type</i>)	NPN <i>open collector output</i>
Control output (<i>Load current</i>)	50 mA max. (<i>sink current</i>)



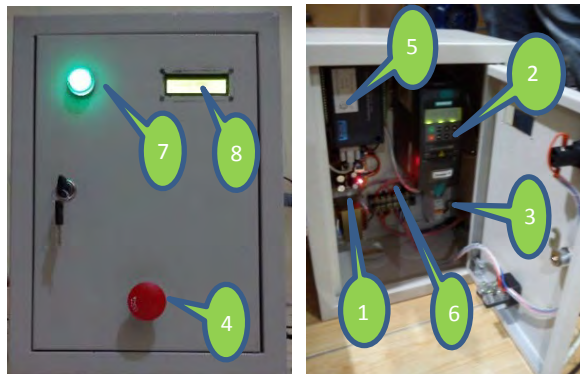
Gambar 3.6 *Rotary Encoder* Autonics E30S4-100-3-N-5 [11]

Pada tugas akhir ini ada 3 kabel koneksi yang digunakan untuk mengaktifkan sensor *rotary encoder* yang memiliki warna dan fungsi berbeda-beda, yaitu *channel A* (*brown*), *supply +5 Volt* (*black*), dan

supply 0 Volt (green). Kabel-kabel ini dihubungkan ke modul *pin evt* yang ada pada DAQ Advantech yang berfungsi sebagai *counter*.

3.2.1.4 Kotak Panel

Secara umum kotak panel berfungsi untuk meletakkan komponen-komponen elektronik menjadi satu kesatuan sehingga memudahkan proses kerja antar komponen serta menjaga komponen-komponen agar tetap aman dari gangguan yang berasal dari luar kotak panel. Pada tugas akhir ini kotak panel yang dirancang terbuat dari bahan logam sehingga lebih kuat dan memiliki ukuran panjang 30cm, lebar 20cm dan tinggi 40cm. Bentuk fisik dari rancangan kotak panel dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Bentuk Fisik Kotak Panel bagian luar dan dalam

Kotak *panel* ini berisikan beberapa komponen seperti rangkaian, antara lain:

1. *Power supply* (5 Volt, 12 Volt, dan 24 Volt)
2. *Inverter* Siemens Macromaster 420
3. *Mini Circuit Breaker (MCB)*
4. *Emergency Stop*
5. *DAQ Advantech*
6. *Terminal*
7. lampu indikator
8. lobang untuk melihat LCD *inverter*





3.2.2 Perancangan Elektrik

Perancangan ini berupa perancangan komponen elektronik yang dibutuhkan untuk membangun sistem. Adapun komponen yang dimaksud adalah *inverter*, DAQ USB 4716 Advantech, dan sensor arus.

3.2.2.1 *Inverter* Siemens Micromaster 420

Agar nantinya motor bisa dikendalikan melalui *inverter*, maka perlu dilakukan serangkaian proses *Quick Commissioning* untuk memasukan nilai-nilai parameter. *Quick comissioning* adalah cara mudah untuk mengkonfigurasi micromaster 420 secara optimal terhadap motor tertentu yang berarti memberikan tugas kepada *inverter* untuk menjalankan motor. Namun ada beberapa data atau parameter yang harus dimasukkan atau diubah sesuai *name plate* pada motor yang akan digunakan, seperti batas frekuensi operasi, waktu *ramp-up*, waktu *ramp-down*, dan lain-lain. Nilai parameter yang dimasukkan harus sesuai dengan spesifikasi mekanis dari motor yang akan diatur kecepatannya. Berikut langkah-langkah dalam proses *Quick Commissioning* :

Tabel 3.3 Langkah-Langkah *Quick Commissioning*

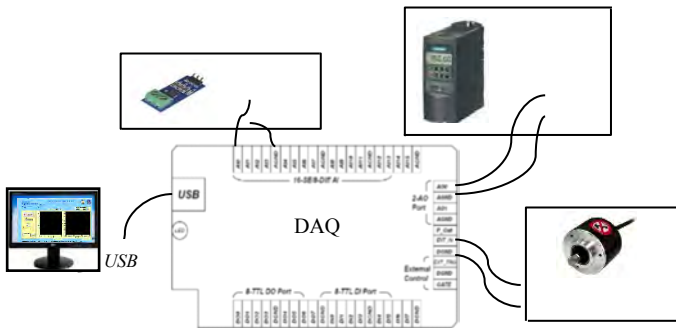
Parameter	Keterangan
P003 (<i>User Access Level</i>)	P003 adalah parameter pertama yang muncul dalam proses pemasukan data parameter. Untuk mengakses parameter maka dengan menekan tombol  . Pilih “1”, kemudian tekan kembali tombol  untuk menyimpan nilai parameter.
P0010 (<i>Start Quick Commissioning</i>)	P0010 adalah pengaturan untuk memulai mengubah parameter dari <i>inverter</i> sesuai dengan karakteristik motor. Dengan cara menekan tombol  , maka untuk memulai <i>Quick Comissioning</i> dengan memilih “1”, untuk menyimpan parameter yang sudah diatur tekan tombol  lagi.
P0100 (<i>Operation for Europe / America</i>)	P0100 adalah parameter untuk memilih frekuensi operasi yang akan digunakan untuk menggerakkan motor. Karena frekuensi di Indonesia sendiri hanya menyediakan jaringan listrik dengan frekuensi 50 Hz, sehingga harus memilih opsi “0” pada <i>inverter</i> .

Parameter	Keterangan	
Name Plate Motor		
Alliance-Italy		IEC 34 – CE
TYPE AY 638 -4		N0. 02030688
0,18 KW	0,25 HP	1,07/0,62 A
220/380 V	1310 rpm	LW 52 dB(A)
CONN. Δ/Y	PROT GRADE IP 55	50 Hz 4,7 kG
JB /T8680, 1-1998	Work Rule S1	INS. CLASS F DATE 02
Dari <i>name plate</i> motor di atas masukkan nilai-nilainya pada langkah-langkah <i>quick commissioning</i> berikut ini.		
P0304 (<i>Rated Motor Voltage</i>)	Untuk menentukan nilai suplai tegangan motor. Dalam mengisi parameter ini, nilai yang dimasukkan harus sesuai dengan informasi yang ada pada <i>name plate</i> motor. Besar nominal tegangan motor (Volt) yang tertera pada <i>name plate</i> adalah 380V, sehingga nilai yang harus diisi adalah 380.	
P0305 (<i>Rated Motor Current</i>)	Untuk nilai arus nominal dari motor. Nilai Arus nominal yang ada pada <i>name plate</i> motor yaitu 0,62 A.	
P0307 (<i>Rated Motor Power</i>)	P0307 adalah parameter yang menentukan nilai daya motor. Besar nominal daya motor (kW motor yaitu 0,18 kW.	
P0310 (<i>Rated Motor Frequency</i>)	P0310 adalah parameter yang menentukan nilai frekuensi motor. Besar nominal frekuensi motor yang tertera pada <i>name plate</i> yaitu 50 Hz.	
P0311 (<i>Rated Motor Speed</i>)	P0311 adalah pengaturan untuk menentukan nilai kecepatan motor. Besar nominal kecepatan motor (rpm) pada <i>name plate</i> yaitu 1310 rpm.	
P0700 (<i>Selection of Command Source</i>)	P0700 adalah parameter untuk pemilihan sumber perintah, dimana nantinya akan muncul tiga pilihan, karena semua pengaturan berasal dari <i>inverter</i> itu sendiri tanpa memerlukan perangkat	

Parameter	Keterangan
	lain, maka memilih angka “1” <i>Basic Operator Panel</i> .
P1000 (<i>Selection of Frequency Setpoint</i>)	P1000 adalah parameter untuk menentukan pengontrolan frekuensi <i>inverter</i> . Ada 4 pilihan ketika kita akan menentukan metode pengontrolan frekuensi pada <i>inverter</i> . Karena untuk mengendalikan motor tiga fasa menggunakan <i>DAQ</i> ini memberikan tegangan kerja 0–10V, maka untuk pengendalian frekuensinya menggunakan pilihan “2”, yaitu <i>analog setpoint</i> .
P1080 (<i>Minimum Frequency</i>)	P1080 adalah parameter untuk menentukan nilai minimal frekuensi motor dengan kisaran frekuensi 0 – 650 Hz. Motor yang digunakan diatur minimal frekuensi motor sebesar 0 Hz
P1082 (<i>Maximum Frequency</i>)	Untuk menentukan nilai maksimum frekuensi motor dengan kisaran sebesar 0 – 650 Hz, dimana motor yang digunakan frekuensinya diatur maksimal sebesar 50 Hz.
P1120 (<i>Ramp-up Time</i>)	Untuk menentukan nilai <i>ramp-up time</i> yaitu waktu yang dibutuhkan oleh motor dari keadaan diam sampai frekuensi motor maksimum. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai frekuensi motor maksimum adalah sebesar 4s.
P1121 (<i>Ramp-down time</i>)	Untuk menentukan nilai <i>ramp-down time</i> yaitu waktu yang dibutuhkan oleh motor untuk mengurangi kecepatan motor dari maksimum sampai berhenti. Waktu yang dibutuhkan adalah sebesar 4s.
P3900 (<i>End Quick Commissioning</i>)	Untuk menentukan <i>End Quick Commissioning</i> . Setelah semua parameter telah diatur, maka yang perlu dilakukan adalah memilih angka “1”, yaitu <i>End Quick Commissioning</i> dengan mengatur ulang semua pengaturan pabrik.

3.2.2.2 DAQ USB 4716 Advantech

DAQ Advantech yang digunakan pada tugas akhir ini adalah DAQ dengan tipe USB 4716. Untuk menghubungkan dengan komputer, diperlukan komunikasi dengan kabel USB. Komponen ini berfungsi sebagai otak dari sistem yang dapat merekam dan mengolah data dengan bantuan *software* yang ada di komputer. Gambar 3.8. Merupakan *wiring diagram* antara DAQ, *inverter*, sensor arus, dan *rotary encoder*.



Gambar 3.8 *Wiring* DAQ dengan Beberapa Komponen

Pada tugas akhir ini ada beberapa pin yang digunakan, antara lain:

- 1 pin *analog input* : pin ini digunakan sebagai sinyal masukan dari sensor arus. Dari sensor arus ini kemudian digunakan sebagai *input* untuk kontroler *fuzzy*.
- 1 pin *evt_in* : digunakan sebagai *counter* dari *rotary encoder*. Hasil pembacaan dari *counter* dibandingkan dengan *set point*. Selisih dari keduanya merupakan sinyal *error* yang digunakan sebagai masukan untuk kontroler PID.
- 1 pin *analog output* : digunakan sebagai keluaran dari sinyal kontrol. Keluaran dari sinyal kontrol dimasukkan ke *inverter* untuk men-*drive* motor induksi tiga fasa.

3.2.2.3 Sensor Arus Keyes

Sensor arus digunakan untuk mengetahui efek pembebanan selama motor induksi melakukan proses pembebanan. Sensor arus dipasang seri dengan rem magnetik, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Pemasangan Sensor Arus dengan Rem Elektromagnetik

Sensor arus yang digunakan adalah sensor arus ACS712-5 dari produk Keyes. Sensor ini merupakan modul sensor untuk mendeteksi besar arus yang mengalir lewat blok terminal dengan memanfaatkan efek *Hall*. Besar arus maksimum yang dapat dideteksi sebesar 5A di mana tegangan pada pin keluaran akan berubah secara linear mulai dari 2,5 Volt ($\frac{1}{2} \times V_{CC}$, tegangan catu daya $V_{CC} = 5V$) untuk kondisi tidak ada arus hingga 4,5V pada arus sebesar +5A atau 0,5V pada arus sebesar -5A (positif/negatif tergantung polaritas, nilai di bawah 0,5V atau di atas 4,5V dapat dianggap lebih dari batas maksimum). Perubahan tingkat tegangan berkorelasi linear terhadap besar arus sebesar 40 mV / Ampere. Efek *Hall* adalah fenomena fisika dimana aliran listrik / elektron dalam pelat konduktor terpengaruh oleh paparan medan magnet. Bentuk fisik modul sensor arus Keyes ditunjukkan pada Gambar 3.10. Spesifikasi sensor arus ACS 712 adalah sebagai berikut:

Tegangan Catu daya	: 5 Volt
Sensitivitas Keluaran	: 185mV/A
Suhu maksimum	: 40 drajat Celcius
Arus masukam maksimal	: 5 A

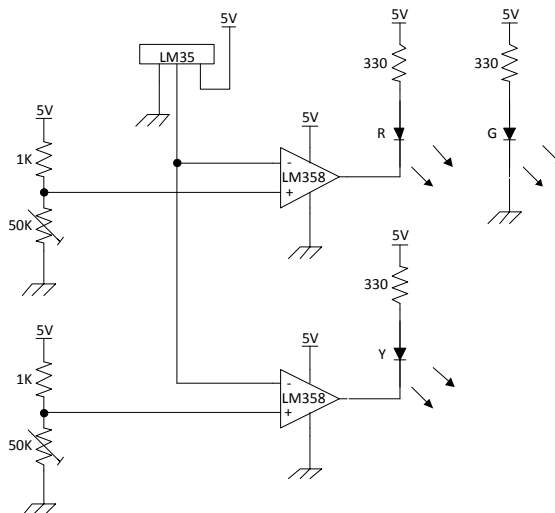


Gambar 3.10 Modul *Keyes Current Sensor*

Konfigurasi sensor ini memiliki 2 terminal masukan dari arus yang mau diukur, satu tegangan catu daya 5 Volt, satu tegangan 0 Volt, dan 1 pin keluaran.

3.2.2.4 Sensor Temperatur

Sensor temperatur digunakan untuk memonitoring agar rem elektromagnetik tidak bekerja pada temperatur maksimum. Ketika rem elektromagnetik bekerja pada kondisi temperatur maksimum (*overheat*) menyebabkan rem kehilangan daya cengkramnya karena medan magnet yang dihasilkan berkurang akibat panas. Sensor temperatur dipasang menempel pada kedua sisi rem magnetik. Pada tugas akhir ini digunakan sensor temperatur LM35 yang dipasang pada bagian kiri dan kanan piringan rem magnetik. Terdapat tiga warna indikator yang mengindikasikan level panas dari piringan magnet tersebut. Warna hijau menandakan On yaitu $< 0^{\circ}\text{C}$, warna kuning menandakan panas antara *range* 40°C sampai 60°C , warna merah menandakan panas telah melebihi batas 60°C dan juga mengindikasikan untuk segera menghentikan operasi pengereman karena pada kondisi ini rem magnet sudah tidak bekerja secara optimal. Berikut skema rancangan dari sensor temperatur pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Wiring Perancangan Sensor Temperatur

3.3 Perancangan Perangkat Lunak

Dalam perancangan ini, digunakan dua perangkat lunak untuk pengambilan data, identifikasi, simulasi dan implementasi kontroler. Ada perangkat lunak Matlab R2010a yang digunakan untuk identifikasi sistem. Dan ada juga perangkat lunak Labview 2013 yang digunakan untuk pengambilan data, simulasi dan implementasi kontroler. Dan juga satu perangkat lunak dari DAQ yaitu Advantech Navigator yang berfungsi untuk mengaktifkan pin yang ada di DAQ.

3.3.1 Perangkat Lunak Matlab R2010a

Matlab adalah singkatan dari MATrix LABoratory, merupakan bahasa pemrograman yang dikembangkan oleh The Mathwork Inc. Pada tugas akhir ini, perangkat lunak Matlab yang digunakan adalah Matlab R2010a. Perangkat ini digunakan sebagai alat bantu untuk identifikasi sistem. Untuk identifikasi sistem digunakan *toolbox identification* dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- Panggil *toolbox* identifikasi pada *command window* dengan *key word* "ident" maka akan muncul *toolbox* identifikasi sistem.
- Masukkan data pada kolom "Import data" yang sudah ada di *workspace*.
- Klik kolom "Estimate" untuk metode identifikasi, kemudian pilih *linier parametric models* atau *prosess models*.
- Pilih spesifikasi sistem pendekatan model yang diinginkan.
- Setelah muncul pada kolom model, centang "model output" untuk melihat hubungan antara data hasil pengukuran dan model.
- Kemudian drak ke kolom "To LTI Viewer" untuk mendapatkan model matematikanya.

3.3.2 Perangkat Lunak Labview 2013

Labview adalah sebuah *software* pemrograman yang diproduksi oleh *National Instruments* dengan konsep bahasa pemrograman berbasis grafis atau blok. Program Labview dikenal dengan sebutan "VI" atau *Virtual Instruments* karena penampilan dan operasinya dapat meniru sebuah instrument. Pada Labview, user pertama-tama membuat *user interface* atau *front panel* dengan menggunakan kontrol dan indikator, yang dimaksud dengan kontrol adalah *knobs*, *push buttons*, *dials* dan peralatan *input* lainnya sedangkan yang dimaksud dengan indikator

adalah *graph*, LED dan peralatan *display* lainnya. Setelah menyusun *user interface*, lalu *user* menyusun diagram blok yang berisi kode-kode VI untuk mengatur *front panel*. *Software* Labview terdiri dari tiga komponen utama, yaitu *front panel*, blok diagram VI, serta *control* dan *function palette*.

Pada tugas akhir ini Labview yang digunakan adalah Labview 2013 yang berfungsi sebagai monitoring data dan menyimpan data. Dari data yang tersimpan kemudian akan diidentifikasi untuk dijadikan model dari *plant* motor induksi. Selain itu juga akan digunakan sebagai simulasi dan implementasi kontroler dengan bantuan DAQ.

3.3.3 Perangkat Lunak Advantech Navigator

Perangkat ini diperlukan untuk mengaktifkan DAQ agar *channel* yang tersedia pada komponen DAQ bisa berfungsi sebagaimana mestinya. Setelah semua *channel* DAQ berfungsi dengan baik, baru kemudian masukkan DAQ pada perangkat lunak Labview dengan prosedur sebagai berikut:

- Klik kanan pada jendela blok diagram Labview.
- Pilih Measurement I/O → DAQ Navi → DAQ Assistant.
- Posisikan DAQ pada tempat yang diinginkan.
- Tentukan *analog input/output*.
- Pilih Instant AI/AO.
- Untuk device yang ingin dikonfigurasi, pilih USB-4716, BID#1
- Pilih *channel* yang diinginkan, pada kolom *signal* pilih *range* tegangan 0 - 10 V untuk *analog output*.
- Atur *Scan channel* = 0, *Start* = 0, *Count* = 15, *Scaled Data*
- *Overview* konfigurasi yang telah ditentukan sebelumnya akan muncul, lalu pilih *Finish*.

3.4 Pemodelan Plant

Pada tugas akhir ini proses identifikasi dinamis dilakukan dengan memberikan sinyal uji PRBS. Sinyal uji PRBS diberikan melalui Labview yang kemudian diteruskan ke DAQ Advantech dengan *range set point* 5,5 - 6,5 Volt atau 638 - 754 rpm kemudian dilanjutkan dengan memberikan beban pada *plant*. Pada proses pembebanan ini dibagi menjadi 3 yaitu beban minimal, nominal, dan maksimal. Pembebanan dilakukan untuk melihat respon kecepatan motor induksi pada keadaan

yang berbeda-beda. Pengambilan data dilakukan ketika motor tanpa dan dikasih beban elektromagnetik. Metode pembebanan dilakukan pada keadaan berikut:

- Beban Minimal : beban elektromagnetik 0 Volt
- Beban Nominal : beban elektromagnetik 140 Volt
- Beban Maksimal : beban elektromagnetik 220 Volt

3.4.1 Konfigurasi Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

Pengambilan data kecepatan motor induksi dilakukan dengan menggunakan perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras yang digunakan adalah *encoder* Autonich dan DAQ Advantech. Perangkat lunak yang digunakan adalah LabView 2013 untuk merekam respon kecepatan yang terbaca pin *evt_in* pada DAQ.

Konfigurasi perangkat keras dan perangkat lunak untuk identifikasi ditunjukkan pada Gambar 3.12. Kecepatan referensi diberikan melalui perangkat lunak Labview. Program dari Labview menggerakkan motor induksi. Kecepatan motor induksi dibaca oleh *encoder* sebagai pulsa. Data hasil pembacaan DAQ direkam oleh program pada perangkat lunak LabView.



Gambar 3.12 Mekanisme Proses Identifikasi

Port evt_in pada DAQ digunakan untuk membaca data keluaran dari *encoder*. Data yang dibaca oleh DAQ dalam bentuk frekuensi sehingga untuk dapat menampilkan kecepatan motor yang sebenarnya perlu dikonversi terlebih dahulu. Perhitungan untuk konversi ini dilakukan pada diagram blok LabView 2013.

Tampilan *front panel* pada LabView 2013 ditunjukkan seperti pada Gambar 3.13. Hasil pembacaan DAQ yang sudah dikonversi menjadi nilai kecepatan sebenarnya ditampilkan pada grafik yang

didesain pada bagian *front panel* LabView 2013. Ketika program dijalankan, respon kecepatan terlihat pada grafik dan data yang terekam disimpan pada file dengan ekstensi *.txt. *Time sampling* yang digunakan pada proses pengambilan data *encoder* adalah 0,010 detik.



Gambar 3.13 *Front Panel* Labview 2013 untuk Memonitor Respon Plant.

3.4.2 Pemilihan Metode

Pemilihan metode terbaik dilakukan dengan validasi. Masing-masing fungsi alih yang telah diperoleh diuji dan dibandingkan hasilnya dengan data hasil pengukuran. Metode validasi yang digunakan adalah ISE (*Integral Square Error*). Semakin kecil nilai ISE, maka semakin baik fungsi alih yang dibuat. Perhitungan ISE dirumuskan pada Persamaan 3.1.

$$ISE = \int_0^t e(t)^2 dt \quad (3.1)$$

Hasil perhitungan ISE dari dua metode diberikan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Fungsi alih dari dua metode

No	Fungsi Alih	Metode	ISE
1	$\frac{-0,02981z + 0,06854}{z^2 - 1,106z + 0,1395}$	ARX	1909
2	$\frac{54,08}{s^2 + 13,73s + 47,15}$	P2D	1278

Berdasarkan fungsi alih dan perhitungan ISE yang ditunjukkan pada Tabel 3.4, dapat disimpulkan bahwa metode terbaik adalah metode P2D. Metode P2D dipilih karena memiliki nilai ISE yang paling kecil dari semua metode yang diuji coba yaitu 1278.

3.4.3 Identifikasi Beban Minimal

Pada proses identifikasi untuk beban minimal, motor induksi beroperasi tanpa beban/ proses pengereman. Untuk identifikasi beban minimal, dilakukan percobaan sebanyak 5 kali. Fungsi alih dan ISE untuk setiap percobaan ditunjukkan pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Hasil Identifikasi pada Beban Minimal

No	Model Matematis	ISE
1	$\frac{-1,776e^{-015}s + 67,58}{s^2 + 15,28s + 58,36}$	2535
2	$\frac{202}{s^2 - 44,75s + 173,9}$	2000
3	$\frac{15,69}{s^2 + 7,36s + 13,55}$	3354
4	$\frac{59,11}{s^2 + 14,18s + 50,27}$	1533
5	$\frac{56,35}{s^2 + 14,66s + 48,56}$	1415

Berdasarkan fungsi alih pada Tabel 3.5, dapat disimpulkan bahwa ISE terkecil bernilai 1415. Sehingga, hasil identifikasi yang digunakan untuk beban minimal adalah fungsi alih nomor 5, yaitu:

$$\frac{56,35}{s^2 + 14,66s + 48,56} \quad (3.2)$$

3.4.4 Identifikasi Beban Nominal

Pada proses identifikasi untuk beban nominal, motor induksi diberikan beban elektromagnetik dengan catu daya sebesar 140 Volt. Identifikasi beban nominal, dilakukan percobaan sebanyak 5 kali. Fungsi alih dan ISE untuk setiap percobaan ditunjukkan pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Hasil Identifikasi pada Beban Nominal

No	Model Matematis	ISE
1	$\frac{85,78}{s^2 + 19,48s + 75,45}$	1777
2	$\frac{-1,776e^{-015}s + 25,04}{s^2 - 9,7s + 521,89}$	2131
3	$\frac{54,08}{s^2 + 13,73s + 47,15}$	1278
4	$\frac{144,7}{s^2 + 43,27s + 126,2}$	1429
5	$\frac{48,32}{s^2 + 20,15s + 73,58}$	2144

Berdasarkan fungsi alih pada Tabel 3.6, dapat disimpulkan bahwa ISE terkecil bernilai 1278. Sehingga, hasil identifikasi yang digunakan untuk beban nominal adalah fungsi alih nomor 3, yaitu:

$$\frac{54,08}{s^2 + 13,73s + 47,15} \quad (3.3)$$

3.4.5 Identifikasi Beban Maksimal

Pada proses identifikasi untuk beban maksimal, motor induksi diberi rem elektromagnetik sebesar 220 Volt. Untuk identifikasi beban maksimal, dilakukan percobaan sebanyak lima kali. Fungsi alih dan ISE untuk setiap percobaan ditunjukkan pada Tabel 3.7

Tabel 3.7 Hasil Identifikasi pada Beban Maksimal

No	Model Matematis	ISE
1	$\frac{3,553e^{-015}s + 57,88}{s^2 + 14,23s + 50,58}$	1473
2	$\frac{5,938}{s^2 - 4,578s + 5,24}$	1,255e4
3	$\frac{-1,776e^{-015}s + 61,71}{s^2 + 15,21s + 54,48}$	1630
4	$\frac{-1,776e^{-015}s + 55,65}{s^2 + 13,98s + 48,88}$	1377
5	$\frac{53,54}{s^2 + 13,73s + 47,09}$	1244

Berdasarkan fungsi alih pada Tabel 3.7, dapat disimpulkan bahwa ISE terkecil bernilai 1244. Sehingga, hasil identifikasi yang digunakan untuk beban maksimal adalah fungsi alih nomor 5, yaitu:

$$\frac{53,54}{s^2 + 13,73s + 47,09} \quad (3.4)$$

3.5 Perancangan Kontroler *Fuzzy*-PID

Ketiga fungsi alih yang diperoleh dari hasil identifikasi berasal dari tiga kondisi pembebanan, yaitu minimal, nominal, dan maksimal. Pembebanan nominal dianggap ketika motor induksi bekerja pada keadaan seharusnya. Pembebanan minimal dan maksimal dianggap sebagai keadaan terjadinya gangguan atau *disturbance*, sehingga untuk meningkatkan performansi sistem, diperlukan perancangan kontroler agar respon sistem beban minimal dan maksimal dapat mendekati respon sistem beban nominal.

Metode kontrol yang digunakan dalam penelitian ini adalah kontroler *fuzzy*-PID. Kontroler ini dipilih karena kontroler *fuzzy* dapat melakukan mekanisme penalaan parameter PID agar parameter PID dapat menyesuaikan dengan kondisi perubahan beban. Mekanisme penalaan parameter kontroler *fuzzy*-PID ditunjukkan pada Gambar 3.1.

3.5.1 Perancangan Kontroler PID

Perancangan kontroler PID dilakukan secara analitik dari parameter fungsi alih yang diperoleh dari hasil identifikasi. Parameter fungsi alih tersebut menentukan parameter K_p , τ_i , dan τ_d . Setiap fungsi alih yang diperoleh pada keadaan masing-masing beban menghasilkan nilai K_p , τ_i , dan τ_d yang berbeda-beda. Hasil perancangan kontroler PID pada kondisi pembebanan berbeda akan digunakan sebagai keluaran dari kontroler *fuzzy*. Untuk parameter fungsi alih *plant*, diberikan persamaan sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{K}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + 1} \quad (3.5)$$

Hasil perancangan PID untuk masing-masing beban dijelaskan sebagai berikut:

1 Beban minimal

Fungsi alih untuk beban minimal seperti diberikan pada Persamaan 3.6.

$$G(s) = \frac{1,16042}{0,02059s^2 + 0,30189s + 1} \quad (3.6)$$

Dengan perhitungan parameter sebagai berikut;

$$\begin{aligned} K &= 1,16042 \\ \frac{1}{\omega_n^2} &= 0,02059 \rightarrow \omega_n = \sqrt{\frac{1}{0,02059}} = 6,969 \\ \frac{2\zeta}{\omega_n} &= 0,30189 \rightarrow \zeta = \frac{6,969 * 0,30189}{2} = 1,05193 \end{aligned} \quad (3.7)$$

Untuk perancangan kontroler PID pada beban minimal, nilai τ yang diinginkan (τ^*) adalah 0,3 detik. Sehingga diperoleh parameter kontroler sebagai berikut;

$$\begin{aligned}
\tau^* &= 0,3 \\
\tau_d &= \frac{1}{2\omega_n \zeta} = 0,0682 \\
\tau_i &= \frac{2\zeta}{\omega_n} = 0,30189 \\
Kp &= \frac{\tau_i}{\tau^* K} = 0,86718
\end{aligned} \tag{3.8}$$

2 Beban nominal

Fungsi alih untuk beban nominal seperti diberikan pada Persamaan 3.9.

$$G(s) = \frac{1,14698}{0,02121s^2 + 0,2912s + 1} \tag{3.9}$$

Dengan perhitungan parameter sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
K &= 1,14698 \\
\frac{1}{\omega_n^2} &= 0,02121 \rightarrow \omega_n = \sqrt{\frac{1}{0,02121}} = 6,8664 \\
\frac{2\zeta}{\omega_n} &= 0,2912 \rightarrow \zeta = \frac{6,86649 * 0,2912}{2} = 0,99974
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Untuk perancangan kontroler PID pada beban nominal, , nilai τ yang diinginkan (τ^*) adalah 0,3 detik. Sehingga diperoleh parameter kontroler sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
\tau^* &= 0,3 \\
\tau_d &= \frac{1}{2\omega_n \zeta} = 0,07284 \\
\tau_i &= \frac{2\zeta}{\omega_n} = 0,2912 \\
Kp &= \frac{\tau_i}{\tau^* K} = 0,84629
\end{aligned} \tag{3.11}$$

3 Beban maksimal

Fungsi alih untuk beban maksimal seperti diberikan pada Persamaan 3.12.

$$G(s) = \frac{1,13697}{0,02124s^2 + 0,29157s + 1} \quad (3.12)$$

Dengan perhitungan parameter sebagai berikut;

$$\begin{aligned} K &= 1,13697 \\ \frac{1}{\omega_n^2} &= 0,02124 \rightarrow \omega_n = \sqrt{\frac{1}{0,02124}} = 6,8616 \\ \frac{2\zeta}{\omega_n} &= 0,29157 \rightarrow \zeta = \frac{6,8616 * 0,29157}{2} = 1,0003 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Untuk perancangan kontroler PID pada beban maksimal, , nilai τ yang diinginkan (τ^*) adalah 0,3 detik. Sehingga diperoleh parameter kontroler sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \tau^* &= 0,3 \\ \tau_d &= \frac{1}{2\omega_n\zeta} = 0,07285 \\ \tau_i &= \frac{2\zeta}{\omega_n} = 0,29157 \\ Kp &= \frac{\tau_i}{\tau^*K} = 0,85482 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Hasil perancangan kontroler PID pada beban minimal, nominal, dan maksimal diberikan pada Tabel 3.8.

Tabel 4.8. Parameter kontroler PID

Parameter	Minimal	Nominal	Maksimal
Kp	1,16042	0,84629	0,85482
τ_i (detik)	0,30289	0,29120	0,29157
τ_d (detik)	0,06820	0,07284	0,07285

3.5.2 Perancangan Mekanisme Penalaan dengan Kontroler *Fuzzy*

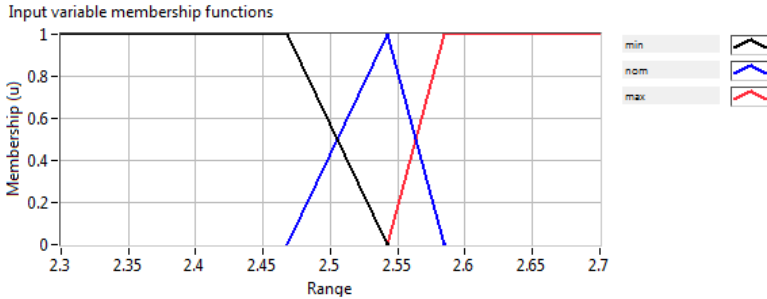
Pada dasarnya, kontroler PID hanya dapat digunakan pada *plant* dengan satu fungsi alih saja. Sehingga, kontroler PID tidak dapat digunakan pada keadaan beban berubah dengan fungsi alih yang berbeda. Pada penelitian ini, digunakan tiga metode pembebanan yang menghasilkan tiga fungsi alih dan parameter kontroler PID yang berbeda. Oleh karena itu, diperlukan kontroler *fuzzy* untuk menala parameter PID.

Perubahan beban diketahui dari arus yang mengalir. Perubahan beban juga menyebabkan terjadinya perubahan arus. Agar sistem dapat mendeteksi perubahan arus, digunakan sensor arus. Sensor arus inilah yang memberi umpan balik jika terjadi perubahan beban. Hasil pembacaan sensor arus dibaca sebagai masukan kontroler *fuzzy*, sehingga keluaran kontroler *fuzzy* menghasilkan parameter K_p , τ_i , dan τ_d yang sesuai dengan perubahan beban.

Perancangan kontroler *fuzzy* pada perangkat lunak Labview menggunakan *toolbox* yang sudah disediakan. Tipe kontroler *fuzzy* yang digunakan adalah tipe Mamdani dengan fungsi keanggotaan segitiga dan *singleton*. Perbedaan kontroler *fuzzy* Mamdani segitiga dan *singleton* terletak pada fungsi keanggotaan keluaran.

3.5.2.1 Fungsi Keanggotaan Masukan

Masukan kontroler *fuzzy* yang digunakan adalah hasil pembacaan tegangan keluaran sensor arus yang mengalir melalui rem elektromagnetik. Perbedaan keluaran sensor arus pada masing-masing pembebanan merepresentasikan perubahan beban. Perubahan beban tidak terjadi secara kontinyu, sehingga kontroler *fuzzy* berfungsi seperti *switching* atau pemilih parameter kontroler PID. Fungsi keanggotaan masukan kontroler *fuzzy* menggunakan variabel arus. Nilai linguistik didefinisikan dengan Min, Nom, Max. Fungsi keanggotaan masukan kontroler *fuzzy* ditunjukkan pada Gambar 3.14. Hasil pembacaan sensor arus pada tiga kondisi pembebanan dijelaskan pada subbab 4.1.4 Pengujian Sensor Arus pada Kondisi Berbeban.



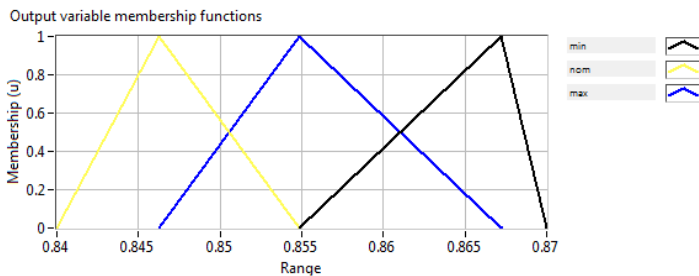
Gambar 3.14 Fungsi keanggotaan masukan Kontroler

3.5.2.2 Fungsi Keanggotaan Keluaran

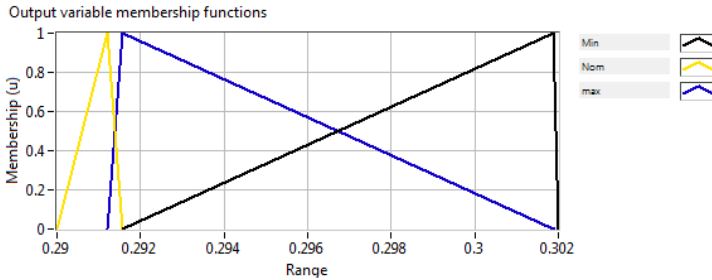
Fungsi keanggotaan keluaran kontroler *fuzzy* berdasarkan pada perhitungan nilai K_p , τ_i , dan τ_d yang diperoleh pada tiga kondisi pembebanan

1. Kontroler *Fuzzy* Mamdani dengan Fungsi Keanggotaan Segitiga

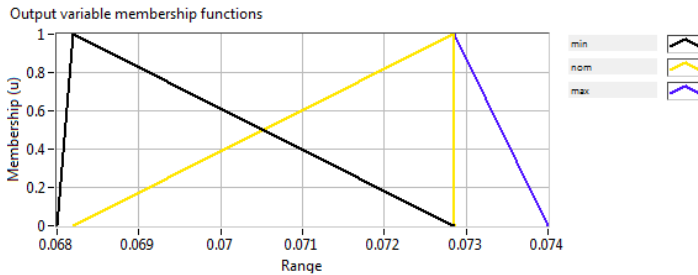
Perancangan fungsi keanggotaan keluaran kontroler *fuzzy* Mamdani menggunakan bentuk fungsi keanggotaan segitiga yang terdiri dari tiga fungsi keanggotaan keluaran dengan tiga variabel yaitu K_p , τ_i , dan τ_d . Masing-masing keluaran memiliki tiga nilai linguistik yaitu kecil, sedang, dan besar. Masing-masing fungsi keanggotaan segitiga memberikan nilai puncak sesuai dengan hasil perhitungan parameter kontroler PID. Fungsi keanggotaan keluaran segitiga untuk kontroler *fuzzy* Mamdani ditunjukkan pada Gambar 3.15 untuk K_p , Gambar 3.16 untuk τ_i , dan Gambar 3.17 untuk τ_d .



Gambar 3.15 Fungsi Keanggotaan Segitiga Keluaran K_p



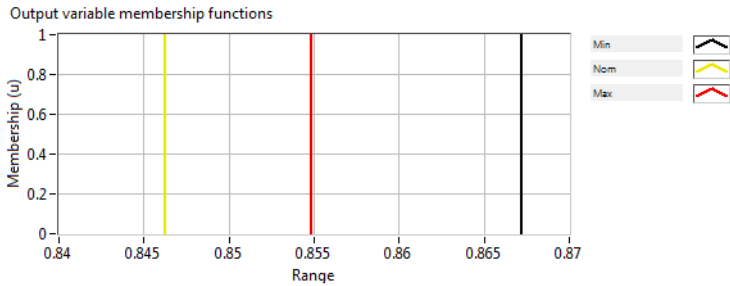
Gambar 3.16 Fungsi Keanggotaan Segitiga Keluaran τ_i



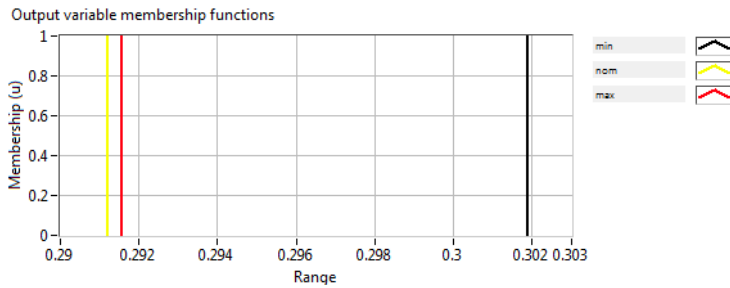
Gambar 3.17 Fungsi Keanggotaan Segitiga keluaran τ_d

2. Kontroler *Fuzzy* Mamdani Fungsi Keanggotaan *Singleton*

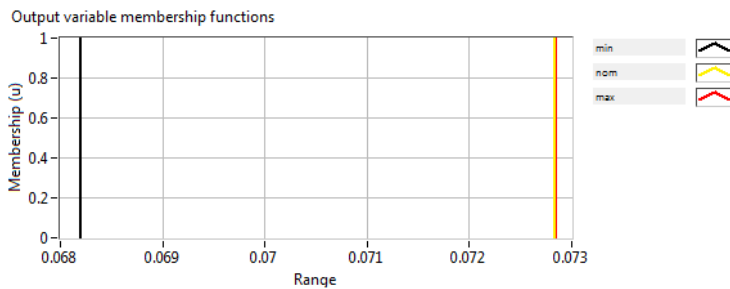
Fungsi keanggotaan keluaran kontroler *fuzzy* Mamdani yang ke dua menggunakan fungsi keanggotaan *singleton* yang terdiri dari tiga fungsi keanggotaan keluaran dengan tiga variabel yaitu K_p , τ_i , dan τ_d . Masing-masing keluaran memiliki tiga nilai linguistik yaitu kecil, sedang, dan besar. Masing-masing fungsi keanggotaan *singleton* memberikan nilai konstanta sesuai dengan hasil perhitungan parameter kontroler PID. Fungsi keanggotaan keluaran *singleton* untuk tiap pembebanan ditunjukkan pada Gambar 3.18 untuk K_p , Gambar 3.19 untuk τ_i , dan Gambar 3.20 untuk τ_d .



Gambar 3.18 Fungsi Keanggotaan *Singleton* untuk K_p



Gambar 3.19 Fungsi Keanggotaan *Singleton* untuk τ_i



Gambar 3.20 Fungsi Keanggotaan *Singleton* untuk τ_d

3.5.2.3 Rule Base

Perancangan *rule base* untuk kontroler *fuzzy* diperlukan agar kontroler *fuzzy* dapat bekerja pada suatu *plant*. Berdasarkan fungsi keanggotaan masukan dan keluaran, diperoleh tiga *rule base* yang

ditunjukkan seperti pada Tabel 3.9. *Rule base* yang ditunjukkan pada Tabel 3.9 berlaku sama untuk kontroler *fuzzy* Mamdani keanggotaan segitiga ataupun *singleton*.

Tabel 3.9 *Rule Base* untuk penalaan Parameter PID

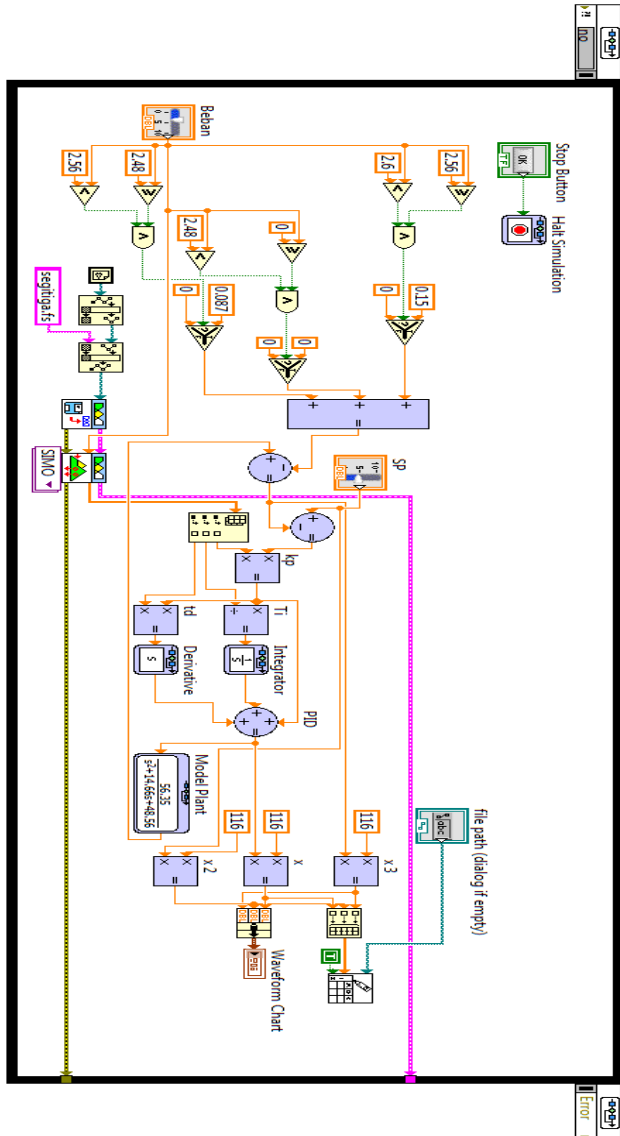
PID\Arus	Min	Nom	Max
K _p	Kecil	Sedang	Besar
τ_i	Kecil	Sedang	Besar
τ_d	Kecil	Sedang	Besar

3.5.2.4 Defuzzifikasi

Pada *toolbox* perangkat lunak Labview, terdapat beberapa pilihan metode defuzzifikasi. Untuk kontroler fuzzy Mamdani, ada lima pilihan defuzzifikasi, yaitu *centroid*, *bisector*, *mean of maximum* (MOM), *smallest of maximum* (SOM), dan *largest of maximum* (LOM). Namun pada tugas akhir ini hanya menggunakan MOM.

3.5.3 Perancangan Simulasi

Sebelum kontroler diimplementasikan dengan *plant* secara langsung, terlebih dahulu disimulasikan dengan perangkat lunak Labview untuk melihat performansi sistem. Gambar 3.21 menunjukkan diagram Simulasi mekanisme penalaan kontroler *fuzzy*-PID. Pada diagram simulasi digunakan model *plant* dari hasil identifikasi dengan pemberian beban minimal. Dan untuk simulasi pembebanannya diberikan konstanta kecepatan yang sesuai dengan selisih antara Y_{ss} dari ketiga model matematika *plant*.

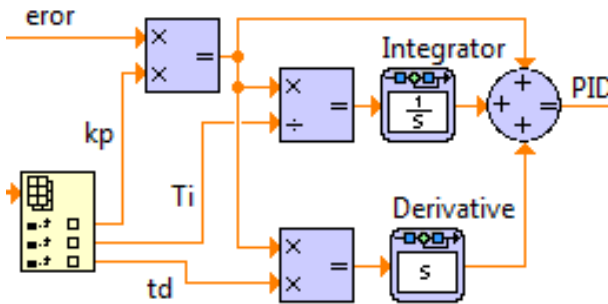


Gambar 3.21 Perancangan Simulasi Kontroler *Fuzzy-PID*

Pada *subsystem* Kontroler PID seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.22, sinyal kesalahan ($e(t)$) dikalikan dengan parameter kontroler K_p , τ_i , dan τ_d menggunakan blok yang sesuai dengan persamaan kontroler PID, yaitu:

$$C(s)E(s) = K_p(1 + 1/\tau_i s + \tau_d s) \quad (3.18)$$

Sinyal kesalahan ($e(t)$) dikalikan dengan keluaran parameter K_p . Untuk parameter τ_i , nilai τ_i dari kontroler *fuzzy* dikalikan dengan keluaran parameter K_p menghasilkan parameter K_i yang selanjutnya dikalikan dengan blok *integrator*. Untuk parameter nilai τ_d dari logika *fuzzy* dikalikan dengan keluaran parameter K_p menghasilkan parameter K_d yang selanjutnya dikalikan dengan blok *derivative*. Ketiga perhitungan parameter kontroler PID tersebut dijumlahkan, sehingga menghasilkan sinyal kontrol yaitu $u(t)$. Blok *saturation* ditambahkan untuk memberikan keluaran maksimal sinyal kontrol. Hal ini diperlukan untuk membatasi tegangan atau kecepatan maksimal yang dikeluarkan oleh sinyal kontrol. Pemberian nilai saturasi bergantung pada kondisi perangkat yang menerima sinyal kontrol. Pada penelitian ini, sinyal kontrol yang dihasilkan dibaca oleh pin ADC DAQ, sehingga tegangan perlu disaturasi antara 0-10 Volt. Pada perancangan simulasi, nilai saturasi yang diberikan adalah 1164 rpm, dimana pada kondisi ini, tegangan yang dihasilkan adalah 10 Volt.



Gambar 3.22 *Subsystem* Kontroler PID

Mekanisme kontroler *fuzzy*-PID dengan Labview 2013 ditunjukkan seperti pada Gambar 3.23. Kecepatan referensi diberikan oleh *slider* dengan *range* 0-10, yang menandakan bahwa sinyal *input* berkisar antara 0 – 10 Volt. Input yang digunakan dalam implementasi adalah 5,5 Volt yang merepresentasikan 648 rpm dan 6,5 Volt yang merepresentasikan 754 rpm. Kemudian sinyal *input* dikurangi dengan sinyal *output* dari DAQ Navi yang berasal dari *rotary encoder*. Selisih antara keduanya dijadikan sinyal *error* yang dijadikan masukan untuk kontroler PID. Selain kontroler PID juga ada kontroler *fuzzy* dengan masukan dari *output* DAQ Navi dari sensor arus. Kontroler *fuzzy* digunakan sebagai penala dari parameter PID. Keluaran dari kontroler PID dihubungkan ke komponen *in range* yang ada pada Labview dengan batas bawah 0 dan batas atas 10, *in range* berfungsi sebagai batas tegangan yang boleh masuk ke DAQ yaitu antara 0 Volt dan 10 Volt.

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS

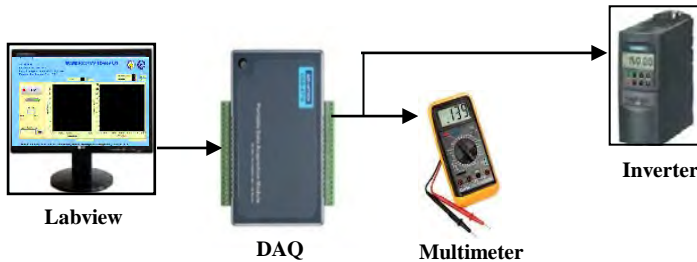
Bab IV membahas tentang hasil pengujian dan analisis dari perancangan sistem. Pada bab ini dibagi menjadi 4 subbab yaitu pengujian perangkat keras, pengujian kontroler secara simulasi, pengujian kontroler secara implementasi, dan analisis. Pengujian dilakukan untuk mengetahui respon *plant* dan performansi sistem secara keseluruhan.

4.1 Pengujian Perangkat Keras

Pengujian terhadap perangkat keras dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui apakah komponen yang digunakan bekerja dengan performansi yang sesuai dengan yang diharapkan apa tidak, jika sudah sesuai maka komponen bisa digunakan.

4.1.1 Pengujian DAQ Advantech dan *Inverter* Micromaster 420

Pengujian DAQ dan *Inverter* Micromaster 420 dilakukan secara bersama. Pengujian dilakukan Labview dengan cara memberikan tegangan ke *output analog* DAQ Advantech yaitu sebesar 0-10VDC sebagai masukan pada *Inverter*. Skema pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.1



Gambar 4.1 Skema Pengujian DAQ dan *Inverter* 420

Pengujian terhadap DAQ dilakukan untuk mengetahui apakah tegangan yang dikeluarkan oleh pin *analog output* sudah sesuai dengan tegangan yang diberikan dari Labview atau tidak. Sedangkan pengujian pada *inverter* dilakukan untuk mengetahui berapa besarnya frekuensi

(Hz) yang dihasilkan oleh *inverter*. Hasil dari pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian DAQ dan *Inverter*

No.	<i>Input</i> dari Labview (Volt)	<i>Analog Output</i> DAQ (Volt)	Frekuensi (Hz)
1	1	0,994	04,78
2	2	1,989	09,78
3	3	2,984	14,78
4	4	3,979	19,78
5	5	4,980	24,78
6	6	5,980	29,78
7	7	6,980	34,78
8	8	7,980	39,78
9	9	8,980	45,78
10	10	9,980	49,78

Berdasarkan Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa *output analog* dari DAQ sudah mengikuti tegangan *input* dari Labview, hanya saja ada *drop* tegangan sebesar 0,02 Volt. Dan besarnya frekuensi yang dihasilkan oleh *inverter* terjadi penurunan sebesar 0,22 Hz disetiap titik cobanya, sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa pengujian ini berhasil dan DAQ serta *inverter* dapat digunakan untuk melakukan mengoperasikan motor induksi tiga fasa.

4.1.2 Pengujian Encoder

Berikut mekanisme proses pengujian *encoder* ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Mekanisme Pengujian *Encoder*

Sesuai dengan mekanisme pengujian pada Gambar 4.2, tegangan *input* motor induksi tiga fasa diberikan dari komputer dengan perangkat

lunak Labview. Kemudian, putaran dari motor dibaca oleh *encoder* yang dihubungkan ke DAQ untuk dibaca frekuensi *output*-nya.

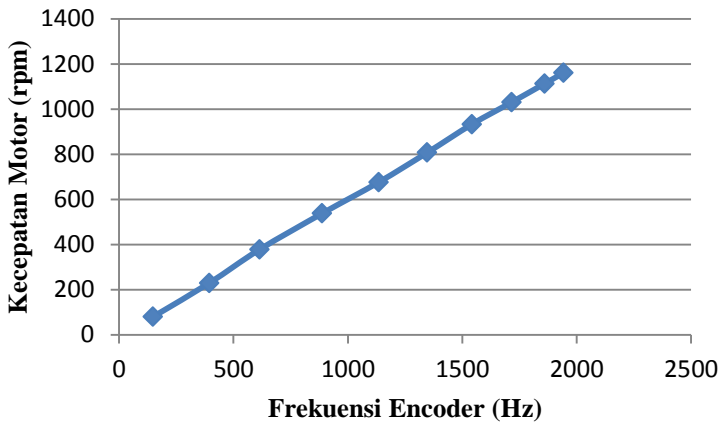
Untuk proses kalibrasi, dilakukan pengukuran kecepatan motor induksi tiga fasa dengan *digital tachometer*. *Digital tachometer* adalah sensor kecepatan yang memanfaatkan sensor cahaya LDR (*Light Dependent Resistor*). Agar dapat menangkap kecepatan motor induksi, poros motor harus diberi warna yang berbeda. Perbedaan warna tersebut membuat lampu LDR membaca nilai tegangan yang berbeda. Pada motor ini, warna yang digunakan di sekeliling poros motor adalah warna hitam, dan warna garis yang digunakan sebagai pembeda tegangan adalah warna putih. Perbedaan nilai tegangan pada perbedaan warna garis inilah yang ditangkap LDR sebagai 1 putaran penuh. Hasil dari pengujian keluaran *encoder* ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Motor Induksi dan Sensor *Rotary Encoder*

Tegangan Input (V)	Kecepatan Tachometer (rpm)	Output Encoder (Hz)
1	80	147
2	230	394
3	378	613
4	538	887
5	676	1134
6	807	1346
7	933	1542
8	1030	1715
9	1113	1860
10	1160	1942

Hubungan kecepatan hasil pengukuran dengan *digital tachometer* dan *encoder* menghasilkan grafik linearitas yang ditunjukkan pada Gambar 4.3. Grafik ini menunjukkan bahwa letak linearitas motor induksi tiga fasa berada pada kecepatan 400-1000 rpm. Persamaan 4.1 adalah persamaan linear yang menunjukkan hubungan kecepatan motor induksi dan *output encoder*.

$$kec = \frac{1160}{1942} \text{ Frekuensi} \quad (4.1)$$



Gambar 4.3 Hubungan Hasil Pengukuran *Encoder* dan *Tachometer*

4.1.3 Pengujian Sensor Temperatur

Sensor temperatur digunakan untuk memonitoring agar rem elektromagnetik tidak bekerja pada temperatur yang terlalu panas. Ketika rem elektromagnetik bekerja pada kondisi temperatur maksimum (*overheat*) menyebabkan rem kehilangan daya cengkramnya karena medan magnet yang dihasilkan berkurang akibat panas. Sensor tempratur ini dihubungkan ke tiga warna LED yaitu hijau, kuning, dan merah. Tempratur maksimum yang menandakan rem elektromagnetik tidak bekerja lagi adalah 60°C yang ditandai dengan menyalnya LED warna merah. Tabel 4.3 menunjukkan hasil pengujian sensor tempratur dan LED sebagai indicator.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Sensor Tempratur dan LED Indikator

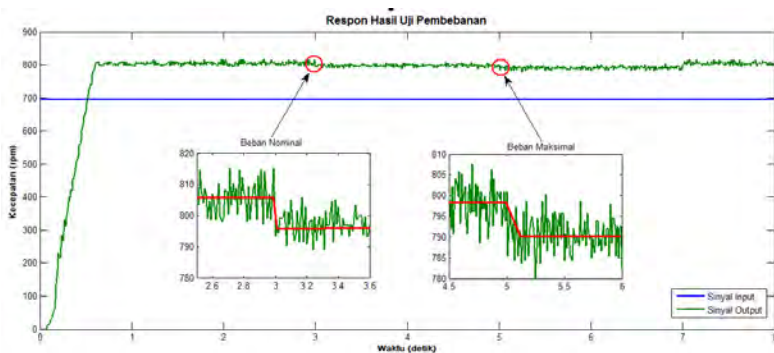
Temperatur (°C)	Indikator					
	Hijau		Kuning		Merah	
	Kiri	Kanan	Kiri	Kanan	Kiri	Kanan
20	Nyala	Nyala	Mati	Mati	Mati	Mati
25	Nyala	Nyala	Mati	Mati	Mati	Mati
30	Nyala	Nyala	Mati	Mati	Mati	Mati
35	Nyala	Nyala	Mati	Mati	Mati	Mati
40	Nyala	Nyala	Nyala	Nyala	Mati	Mati

Temperatur (°C)	Indikator					
	Hijau		Kuning		Merah	
	Kiri	Kanan	Kiri	Kanan	Kiri	Kanan
45	Nyala	Nyala	Nyala	Nyala	Mati	Mati
50	Nyala	Nyala	Nyala	Nyala	Mati	Mati
55	Nyala	Nyala	Nyala	Nyala	Mati	Mati
60	Nyala	Nyala	Nyala	Nyala	Nyala	Nyala

Dari data Tabel 4.3 menunjukkan bahwa sensor temperatur sudah sesuai dengan yang diharapkan. Dimana LED hijau menandakan sensor tersebut dalam kondisi nyala, LED kuning menyala pada temperatur di atas 40°C, dan LED merah menyala setelah sensor mencapai temperatur 60 °C.

4.1.4 Pengujian Rem Elektromagnetik

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui penurunan kecepatan yang disebabkan pembebanan oleh rem elektromagnetik. Pembebanan dibagi menjadi tiga bagian, yaitu beban minimal, beban nominal, dan beban maksimal. Besarnya beban diatur dengan pemberian tegangan dari *autotrafo* ke rem magnetik. Gambar 4.4 menunjukkan grafik penurunan kecepatan dari motor induksi tiga fasa.



Gambar 4.4 Efek Pembebanan pada *Plant*

Dari hasil pengujian tersebut didapatkan data hasil penurunan kecepatan motor induksi tiga fasa yang dijelaskan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Rem Elektromagnetik

Beban	Kecepatan (rpm)
<i>Setpoint</i>	696
Tanpa beban	805
Beban nominal	798
Beban maksimal	791

Dari Tabel 4.4 dapat dilihat bahwa kecepatan tanpa beban sebesar 805 rpm, sedangkan kecepatan setelah diberikan beban nominal adalah 798 rpm sehingga didapat penurunan kecepatan sebesar 7 rpm, dan saat kecepatan pada beban maksimal adalah 791 rpm sehingga didapat penurunan kecepatan pada saat beban maksimum adalah 14 rpm.

4.1.5 Pengujian Sensor Arus pada Rem Elektromagnetik

Rem elektromagnetik berfungsi sebagai beban motor induksi tiga fasa. Hasil rancangan rem elektromagnetik tersebut sulit untuk diukur daya magnetnya dikarenakan faktor tidak diketahuinya karakteristik bahan-bahan yang digunakan dalam pembuatan rem elektromagnetik, sehingga untuk mengetahui efek rem elektromagnetik maka dilakukan monitoring terhadap arus yang menuju kumparan rem elektromagnetik. Pengukuran terhadap arus menggunakan sensor ACS712 dan diukur dengan Avometer. Pengujian dilakukan dengan cara memberikan tegangan DC yang berasal dari *auto transformer* pada 3 kondisi pembebanan, yaitu beban minimal (0 Volt), beban nominal (140 Volt), dan beban maksimal (220 Volt). Hasil dari pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Arus Kumparan Rem Elektromagnetik dan Sensor ACS712-5

Auto Trafo (Volt)	Arus Kumparan (A)	Sensor Arus (Volt)
0	0,000	2,468
140	0,530	2,542
220	0,820	2,584

Hasil pengujian pada Tabel 4.5 menunjukkan semakin besar tegangan yang diberikan oleh *auto transformer* pada kumparan rem elektromagnetik maka arus yang mengalir pada kumparan semakin

besar. Pemberian tegangan maksimal pada rem elektromagnetik hanya dapat mengurangi kecepatan putar motor dibawah 15 rpm. Semakin lama penggunaan rem elektromagnetik akan menyebabkan panas yang ditimbulkan oleh gaya lawan yang melawan putaran piringan *non feremagnetik*. Hal tersebut menyebabkan gaya magnet semakin kecil, sehingga rem elektromagnetik semakin tidak berpengaruh terhadap kecepatan putar motor. Semakin besar tegangan yang diberikan oleh *auto transformator* maka semakin besar pula gaya lawan yang melawan arah putaran piringan *non feremagnetik*.

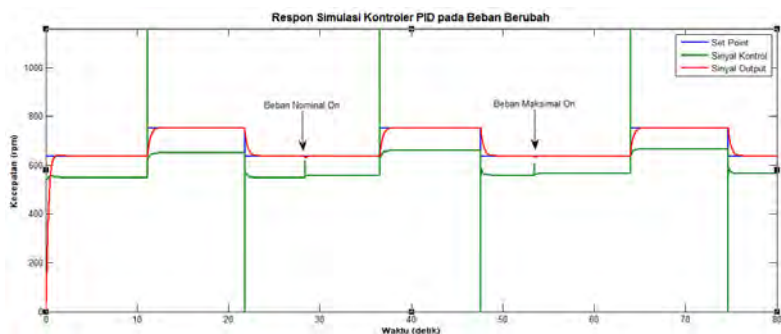
4.2 Pengujian Simulasi Kontroler

Sebelum dilakukan implementasi, terlebih dahulu dilakukan simulasi hasil perancangan kontroler untuk mengetahui performansi sistem. Simulasi pengujian kontroler dilakukan dengan perangkat lunak Labview. Pengujian dilakukan pada tiga kondisi pembebanan, yaitu minimal, nominal, dan maksimal, dengan masukan arus minimal 2,468 Volt; arus nominal 2,542 Volt; dan arus maksimal 2,84 Volt. Nilai arus tersebut digunakan sebagai masukan kontroler *fuzzy* untuk menala parameter kontroler PID.

4.2.1 Pengujian Simulasi Kontroler PID

Parameter kontroler PID yang diperoleh pada Tabel 3.8, diuji dengan respon fungsi alih hasil identifikasi dengan pendekatan beban nominal. Pengujian parameter kontroler PID diperlukan untuk pengujian parameter sebelum kontroler *fuzzy*-PID diterapkan. Respon hasil simulasi kontroler PID ditunjukkan pada Gambar 4.5.

Berdasarkan Gambar 4.5 diperoleh spesifikasi respon motor Induksi setelah diberi kontroler PID. Spesifikasi respon hasil simulasi dengan kontroler PID dapat dilihat pada Tabel 4.6. Berdasarkan spesifikasi tersebut, dapat disimpulkan bahwa spesifikasi respon hasil simulasi dengan kontroler PID telah mendekati respon hasil identifikasi beban nominal namun masih belum sama persis.



Gambar 4.5 Hasil Simulasi dengan Kontroler PID

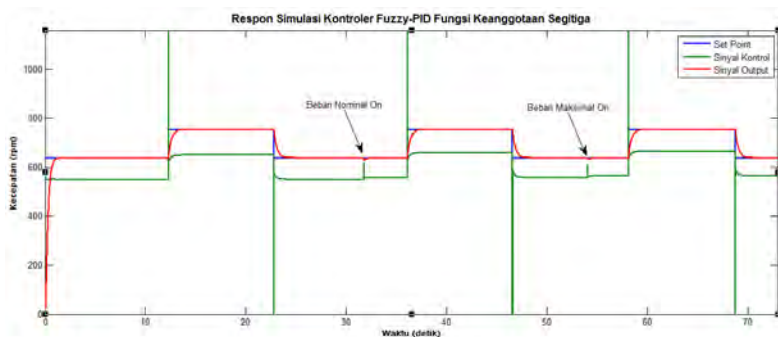
Tabel 4.6 Spesifikasi Hasil Simulasi dengan Kontroler PID

Spesifikasi	Beban Minimal	Beban Nominal	Beban Maksimal
t_s ($\pm 5\%$)	0,85 detik	0,88 detik	0,89 detik
t_r (10%–90%)	0,64 detik	0,64 detik	0,65 detik
t_d	0,19 detik	0,18 detik	0,19 detik
%error	0 %	0 %	0 %

4.2.2 Pengujian dengan Kontroler *Fuzzy*-PID pada Beban Berubah

Kontroler dirancang untuk menghasilkan respon dengan pendekatan respon beban nominal. Gambar 4.6 menunjukkan respon sistem kontroler *fuzzy*-PID dengan kontroler *fuzzy* Mamdani dan fungsi keanggotaan segitiga. Berdasarkan Gambar 4.6, diperoleh spesifikasi respon pada Tabel 4.7. sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan kontroler *fuzzy* Mamdani fungsi keanggotaan segitiga, spesifikasi respon pada beban minimal dan maksimal memberikan spesifikasi respon yang sama persis dengan spesifikasi respon pada beban nominal.

Metode defuzzifikasi yang digunakan pada kontroler *fuzzy* ini adalah metode *Mean of Maximum* (MOM) yang memiliki pengertian bahwa pengambilan solusi *crisp* didasarkan pada rata-rata dari nilai maksimal hasil proses implikasi. Metode defuzzifikasi tersebut menghasilkan penalaran kontroler *fuzzy* yang lebih baik daripada metode defuzzifikasi *centroid* dan *bisector* dikarenakan fungsi keanggotaan keluaran kontroler *fuzzy* yang digunakan adalah segitiga tidak simetris.



Gambar 4.6 Hasil Simulasi Kontroler *Fuzzy*-PID Fungsi Keanggotaan Segitiga

Spesifikasi respon kontroler *fuzzy* Mamdani dengan fungsi keanggotaan segitiga diberikan pada Tabel 4.7 dan respon kontroler *fuzzy* Mamdani dengan fungsi keanggotaan *singleton* diberikan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.7 Spesifikasi Respon Kontroler *Fuzzy*-PID Fungsi Keanggotaan Segitiga

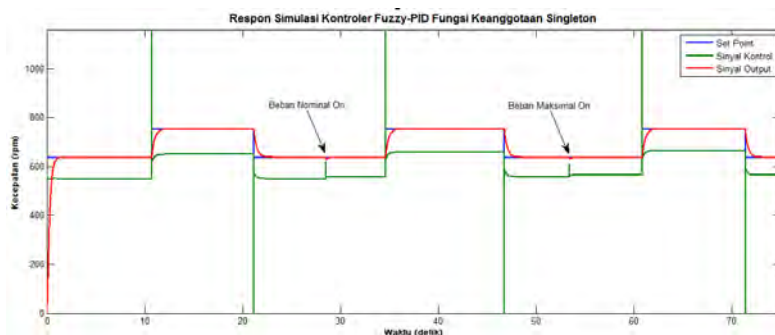
Spesifikasi	Beban Minimal	Beban Nominal	Beban Maksimal
$t_s (\pm 5\%)$	0,85 detik	0,85 detik	0,85 detik
$t_r (10\% - 90\%)$	0,64 detik	0,64 detik	0,64 detik
t_d	0,19 detik	0,19 detik	0,19 detik
%error	0 %	0 %	0 %

Tabel 4.8 Spesifikasi Respon Kontroler *Fuzzy*-PID Fungsi Keanggotaan *Singleton*

Spesifikasi	Beban Minimal	Beban Nominal	Beban Maksimal
$t_s (\pm 5\%)$	0,85 detik	0,85 detik	0,85 detik
$t_r (10\% - 90\%)$	0,64 detik	0,64 detik	0,64 detik
t_d	0,19 detik	0,19 detik	0,19 detik
%error	0 %	0 %	0 %

Gambar 4.7 menunjukkan hasil simulasi kontroler *fuzzy*-PID dengan kontroler *fuzzy singleton*. Berdasarkan Gambar 4.7, diperoleh

kesimpulan bahwa kontroler *fuzzy* Mamdani dengan fungsi keanggotaan *singleton* dapat memberikan spesifikasi respon sama persis pada tiap kondisi pembebanan. Hal ini dikarenakan, masukan arus kontroler *fuzzy* akan memberikan nilai keluaran berupa suatu nilai konstanta sesuai dengan K_p , τ_i , dan τ_d hasil perancangan kontroler PID.



Gambar 4.7 Hasil Simulasi Kontroler *Fuzzy*-PID Fungsi Keanggotaan *Singleton*

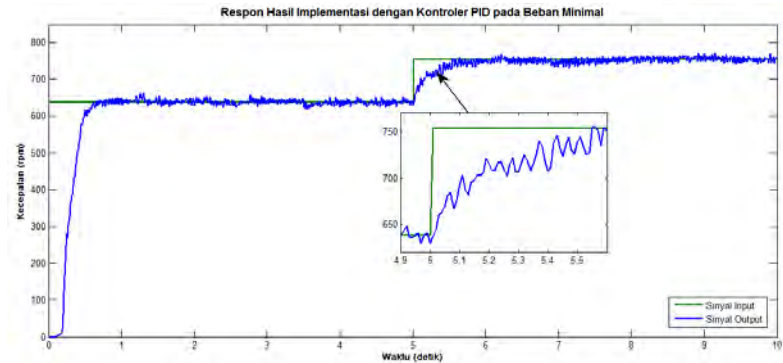
Berdasarkan kedua metode kontroler *fuzzy* yang disimulasikan, dapat diperoleh kesimpulan bahwa kontroler *fuzzy* Mamdani fungsi keanggotaan segitiga dan *singleton* memberikan performansi yang sama. Oleh karena itu, kontroler *fuzzy* yang digunakan untuk implementasi pengujian kontroler digunakan salah satunya. Dan pada implementasi ini digunakan kontroler *fuzzy* Mamdani dengan fungsi keanggotaan *singleton*.

4.3 Pengujian Implementasi Kontroler

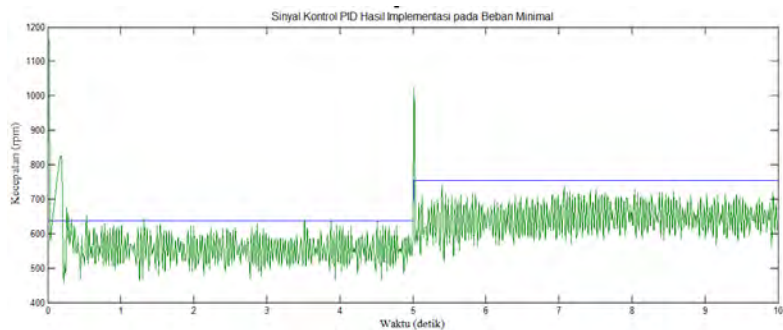
Implementasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Labview. *Interface* perangkat keras dan perangkat lunak menggunakan modul Advantech USB-4716. Implementasi bertujuan untuk mengetahui performansi sistem pada *plant* yang sebenarnya dengan penerapan kontroler *fuzzy*-PID.

4.3.1 Pengujian dengan Kontroler PID pada Beban Berubah

Pengujian dengan kontroler PID pada beban minimal ditunjukkan pada Gambar 4.8. Tegangan keluaran sensor arus yang dihasilkan adalah $\pm 2,40$ - $2,49$ Volt.

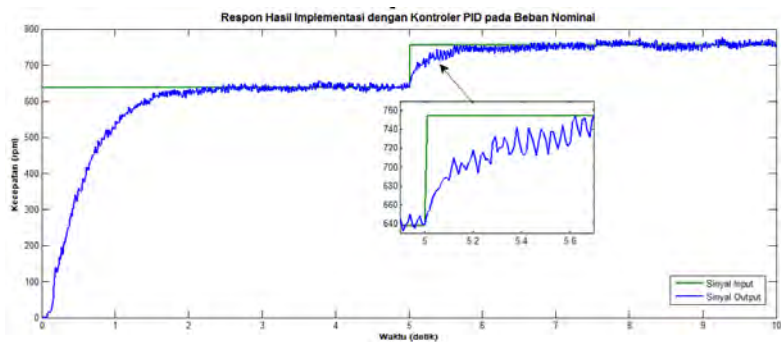


Gambar 4.8 Hasil Implementasi Beban Minimal dengan Kontroler PID



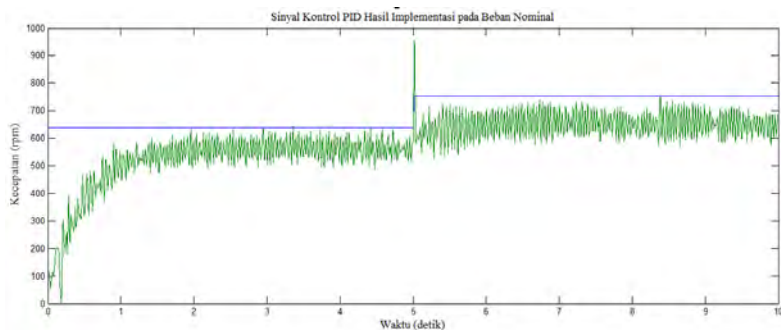
Gambar 4.9 Sinyal Kontrol PID pada Beban Minimal

Gambar 4.9 menunjukkan sinyal kontrol yang dihasilkan sistem. Sinyal kontrol diberi saturasi sebesar 10 Volt, yang menghasilkan kecepatan antara 0-1160 rpm. Pengujian dengan kontroler PID pada beban nominal ditunjukkan pada Gambar 4.10. Tegangan keluaran sensor arus yang dihasilkan adalah $\pm 2,50$ - $2,56$ Volt.



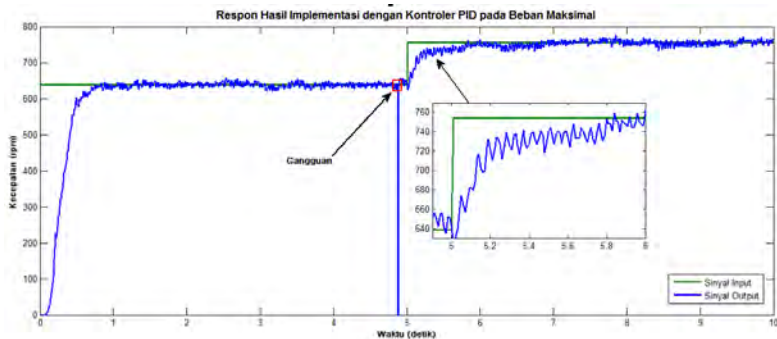
Gambar 4.10 Hasil Implementasi Beban Nominal dengan Kontroler PID

Gambar 4.11 menunjukkan sinyal kontrol yang dihasilkan sistem. Sinyal kontrol diberi saturasi sebesar 10 Volt, yang menghasilkan kecepatan 0-1160 rpm.



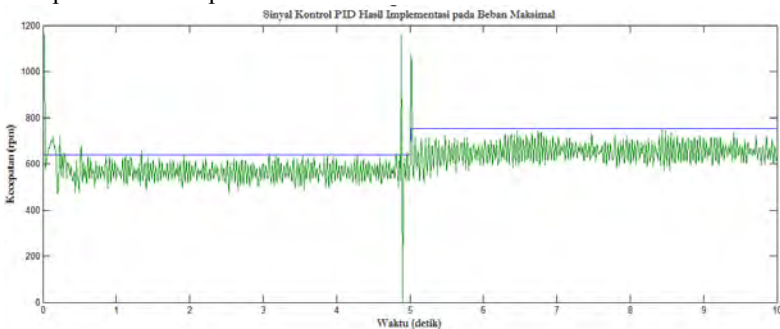
Gambar 4.11 Sinyal Kontrol PID Beban Nominal

Pengujian dengan kontroler PID pada beban maksimal ditunjukkan pada Gambar 4.12. Pada beban maksimal terjadi penurunan respon secara drastis (lingkaran merah). Dengan adanya penurunan drastis tersebut maka kontroler memberikan aksi kontrol maksimal, sehingga respon *plant* akan sedikit naik setelah adanya penurunan drastis. Tegangan keluaran sensor arus yang dihasilkan adalah $\pm 2,57$ -2,6 Volt.



Gambar 4.12 Hasil Implementasi Beban Maksimal dengan Kontroler PID

Gambar 4.13 menunjukkan sinyal kontrol yang dihasilkan sistem. Sinyal kontrol diberi saturasi sebesar 10 Volt, yang menghasilkan kecepatan 0-1160 rpm.



Gambar 4.13 Sinyal Kontrol PID Beban Maksimal dengan Kontroler

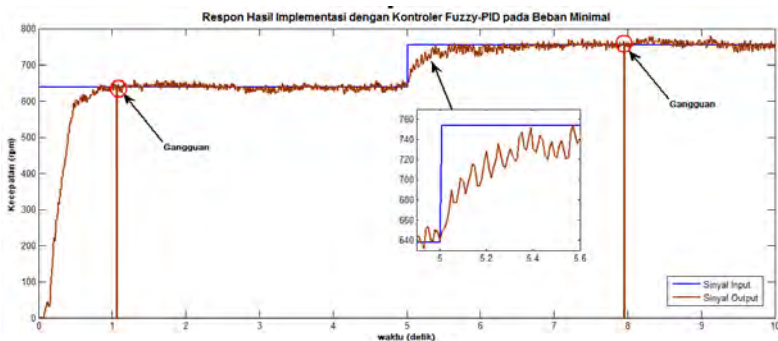
Spesifikasi respon hasil implementasi dengan kontroler PID diberikan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Hasil Implementasi dengan Kontroler PID

Spesifikasi	Beban Minimal	Beban Nominal	Beban Maksimal
t_s ($\pm 5\%$)	0,65 detik	0,78 detik	0,84 detik
t_r (10%–90%)	0,41 detik	0,58 detik	0,67 detik
t_d	0,14 detik	0,15 detik	0,16 detik
%error	0,84 %	0,32 %	0,16 %

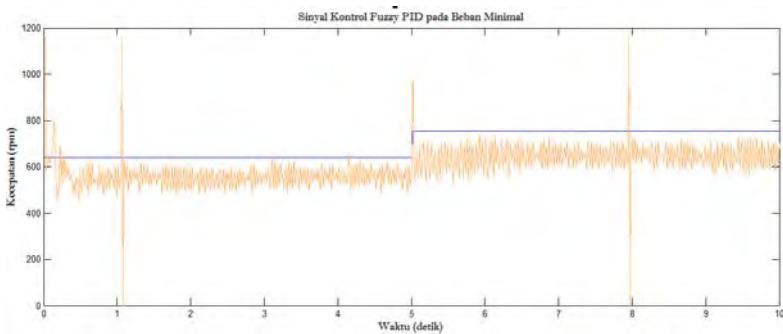
4.4.2 Pengujian dengan Kontroler *Fuzzy*-PID pada Beban Berubah

Pengujian dengan kontroler *fuzzy*-PID pada beban minimal ditunjukkan pada Gambar 4.14. Pada respon implementasi beban minimal terjadi beberapa kali penurunan drastis (lingkaran merah) pembacaan respon dari *encoder*, hal ini disebabkan oleh kontruksi mekanik yang kurang tungguh. Tegangan keluaran sensor arus yang dihasilkan adalah $\pm 2,40$ - $2,49$ Volt.



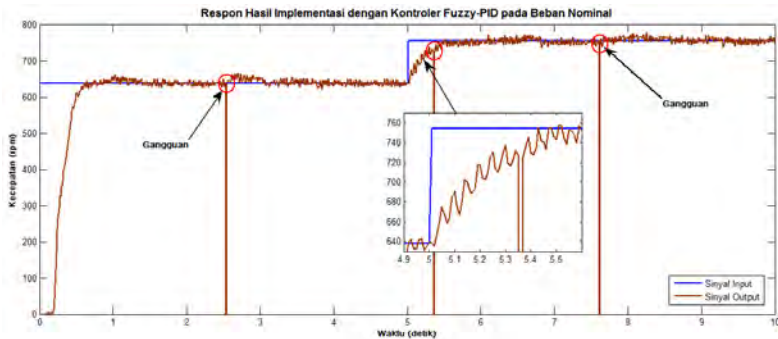
Gambar 4.14 Hasil Implementasi Beban Minimal dengan Kontroler *Fuzzy*-PID

Gambar 4.15 menunjukkan sinyal kontrol yang dihasilkan sistem. Sinyal kontrol diberi saturasi sebesar 10 Volt, yang menghasilkan kecepatan antara 0-1160 rpm.



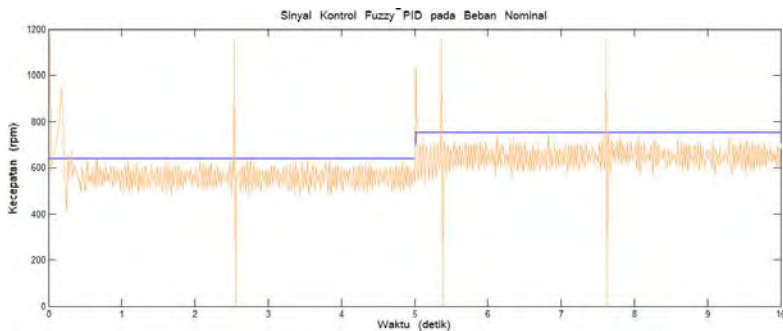
Gambar 4.15 Sinyal Kontrol *Fuzzy*-PID pada Beban Minimal

Pengujian dengan kontroler *fuzzy*-PID pada beban nominal ditunjukkan pada Gambar 4.16. Sama halnya pada respon beban minimal, beban nominal juga terjadi beberapa kali penurunan drastis (lingkaran merah). Tegangan keluaran sensor arus yang dihasilkan adalah $\pm 2,50$ - $2,56$ Volt.



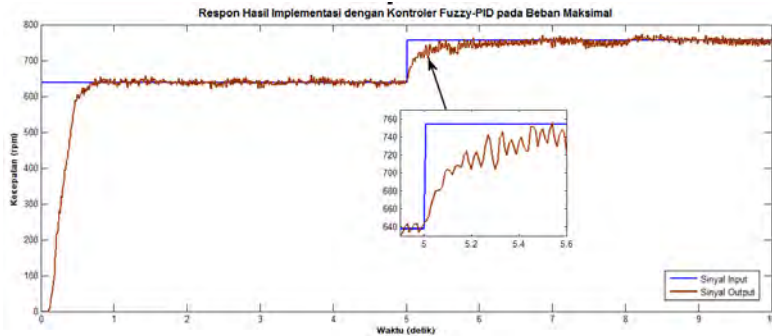
Gambar 4.16 Hasil Implementasi Beban Nominal dengan Kontroler *Fuzzy*-PID

Gambar 4.17 menunjukkan sinyal kontrol yang dihasilkan sistem. Sinyal kontrol diberi saturasi sebesar 10 Volt, yang menghasilkan kecepatan 0-1160 rpm.



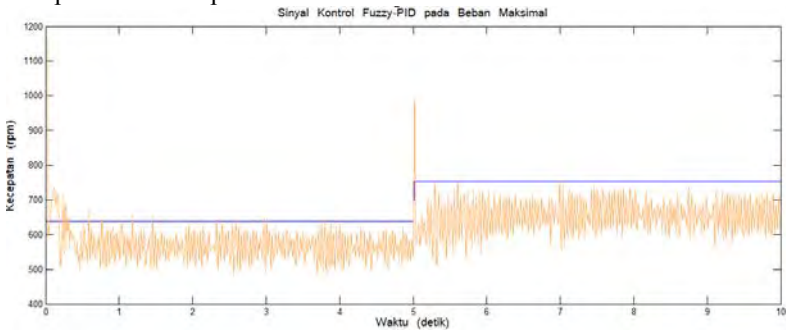
Gambar 4.17 Sinyal Kontrol *Fuzzy*-PID pada Beban Nominal

Pengujian dengan kontroler *fuzzy*-PID pada beban maksimal ditunjukkan pada Gambar 4.18. Tegangan keluaran sensor arus yang dihasilkan adalah $\pm 2,57$ -2,6 Volt.



Gambar 4.18 Hasil Implementasi Beban Maksimal dengan Kontroler *Fuzzy*-PID

Gambar 4.19 menunjukkan sinyal kontrol yang dihasilkan sistem. Sinyal kontrol diberi saturasi sebesar 10 Volt, yang menghasilkan kecepatan 0-1160 rpm.



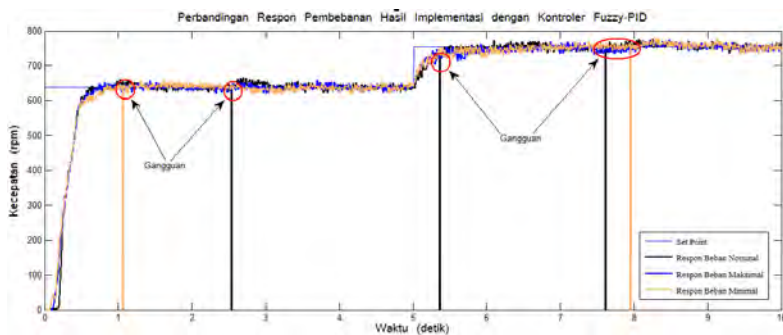
Gambar 4.19 Sinyal Kontrol *Fuzzy*-PID pada Beban Maksimal

Perbandingan ketiga kondisi pembebanan setelah diberi kontroler *fuzzy*-PID ditunjukkan pada Gambar 4.20. Berdasarkan Gambar 4.20, dapat disimpulkan bahwa parameter kontroler *fuzzy*-PID pada beban minimal dan beban maksimal dapat menghasilkan respon mendekati

beban nominal. Spesifikasi T_s pada beban minimal adalah 0,67 detik, pada beban nominal 0,63 detik, dan pada beban maksimal adalah 0,70 detik. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa pemberian kontroler *fuzzy*-PID pada sistem pada kedua kondisi pembebanan memiliki spesifikasi T_s yang saling mendekati. Spesifikasi respon hasil implementasi dengan kontroler *fuzzy*-PID diberikan pada Tabel 4.10.

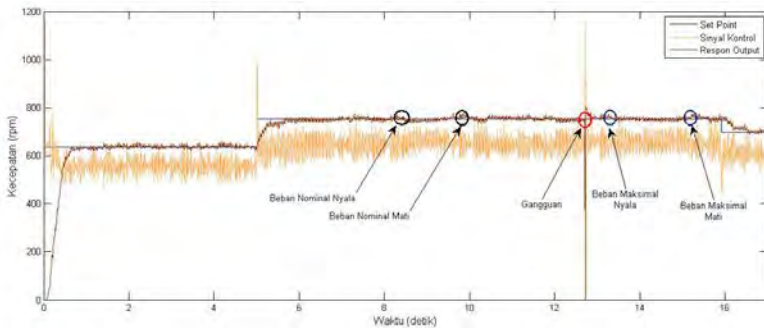
Tabel 4.10 Hasil Implementasi dengan Kontroler *Fuzzy*-PID

Spesifikasi	Beban Minimal	Beban Nominal	Beban Maksimal
$t_s (\pm 5\%)$	0,67 detik	0,63 detik	0,70 detik
$t_r (10\%–90\%)$	0,44 detik	0,42 detik	0,50 detik
t_d	0,16 detik	0,17 detik	0,15 detik
%error	0,67 %	1,70 %	1,04 %



Gambar 4.20 Perbandingan Implementasi Kontroler pada Tiga Kondisi Pembebanan

Pengujian kontroler *fuzzy*-PID dengan pemberian beban nominal dan maksimal ditunjukkan pada Gambar 4.21. Dari Gambar 4.21 dapat dilihat saat beban nominal dinyalakan, respon mengalami penurunan dan sinyal kontrol naik sehingga setelah beberapa milidetik respon kembali mendekati respon *steady state*. Begitu juga saat beban maksimal dinyalakan. Namun perubahannya tidak seberapa kelihatan, hal ini dikarenakan efek pengereman yang hanya dapat mengurangi respon kecepatan di bawah 15 rpm.



Gambar 4.21. Respon Implementasi *Fuzzy*-PID dengan Pemberian Beban Nominal dan Beban Maksimal

4.4 Analisis

Dari hasil pengujian masing-masing implementasi kontroler dapat disimpulkan bahwa kontroler *fuzzy*-PID memiliki spesifikasi respon yang hampir konstan pada setiap proses pembebanannya. Berbeda dengan kontroler PID konvensional, pada spesifikasi respon kontroler PID tampak ada perubahan disetiap proses pembebanan, meskipun perubahannya sangat kecil. Hal ini dikarenakan proses pembebanan dari sistem yang digunakan (rem elektromagnetik) hanya mampu memberikan pengereman dengan penurunan kecepatan dibawah 15 rpm. Sehingga parameter kontroler disetiap pembebanan sangat kecil, yaitu hanya berubah di angka ke-3 di belakang koma.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisis terhadap simulasi maupun implementasi pengendalian motor induksi tiga fasa dengan metode *fuzzy*-PID dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kontroler *fuzzy* digunakan sebagai penala parameter PID yang didapatkan dari beberapa model yang diperoleh dari hasil identifikasi beban minimal, beban nominal, dan beban maksimal.
2. Kontroler *fuzzy* yang digunakan pada implementasi adalah kontroler *fuzzy* Mamdani dengan fungsi keanggotaan keluaran *singleton*. Sehingga, keluaran yang dihasilkan adalah nilai konstanta parameter kontroler PID sesuai dengan hasil perancangan.
3. Parameter *Proporsional*, *Integral*, dan *D erivatif* (PID) yang digunakan pada kontrol *fuzzy*-PID masing-masing adalah sebagai berikut;
 - *Plant* beban minimal bernilai $K_p = 1,16042$, $\tau_i = 0,30289$ dan $\tau_d = 0,0682$.
 - *Plant* beban nominal bernilai $K_p = 0,84629$, $\tau_i = 0,2912$, dan $\tau_d = 0,07284$.
 - *Plant* beban maksimal bernilai $K_p = 0,85482$, $\tau_i = 0,29157$, dan $\tau_d = 0,07285$.
4. Pada simulasi dengan kontroler *fuzzy*-PID, didapatkan spesifikasi respon beban minimal dan maksimal telah mengikuti respon beban nominal, dengan t_s (5%) sebesar 0,85 detik, t_r (10% - 90%) sebesar 0,64 detik, dan t_d sebesar 0,19 detik.
5. Pada implementasi dengan kontroler *fuzzy*-PID, didapatkan spesifikasi respon beban minimal dan maksimal telah mendekati respon beban nominal, dengan rata-rata t_s (5%) sebesar 0,67 detik, t_r (10% - 90%) sebesar 0,45 detik, t_d sebesar 0,16 detik, dan nilai rata-rata *%error steady state* 0,67 % - 1,7 %.
6. Kontroler *fuzzy*-PID yang dirancang dapat mempertahankan kecepatan mendekati nilai *set point* dengan *error* kurang dari 2%. Adanya *error* ini dikarenakan seringnya respon mengalami

penurunan secara drastis dan kurangnya data yang diolah sebagai *sample*.

7. Kontroler *fuzzy*-PID dapat diimplementasikan pada DAQ USB 4716 dengan menggunakan Labview+Advantech Navigator.

5.2 Saran

Dari hasil perancangan dan implementasi tugas akhir ini, saran yang dapat diberikan adalah:

1. Pada penelitian selanjutnya sensor suhu perlu diperhitungkan pada pemodelan sistem.
2. Piringan *shaft* sebaiknya menggunakan bahan metal yang bersifat non feromagnetik, sehingga tidak mengakibatkan magnet menjadi permanen.
3. Konstruksi antar komponen harus benar-benar diperhatikan agar tidak terjadi penurunan respon pembacaan *encoder* secara drastis.
4. Aksi rem yang digunakan terlalu kecil sehingga pengaruh ke sistem tidak begitu berasa, oleh karena itu perlu adanya modifikasi rem elektromagnetik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chapman, Stephen J., *“Electric Machinery Fundamentals: Induction Motors”* McGraw-Hill, New York, Amerika Serikat, 2005
- [2] Rizqiawan, Arwindra. *“Sekilas Rotary Encoder”*. 2 Maret 2015. <http://konversi.wordpress.com/2009/06/12/sekilas-rotary-encoder/>
- [3] Arwanjer Semit., *“Perancangan dan Implementasi Kontroler Linear Quadratic Regulator (LQR) pada Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Phasa”*, *Tugas Akhir*, JTE-ITS, Surabaya, 2014.
- [4] _____, *“Getting Started Guide”*, Siemens, September, 2000.
<http://www.siemens.de/micromaster>
- [5] _____, *“Industrial Automation / Data Acquisition (DAQ) & Communication / USB Modules / USB-4716”* Advantech, Agustus, 2013
- [6] Nur Qomarudin, M., *“Identifikasi Parametrik: Studi Simulasi Terhadap Motor DC” Karya Ilmiah*, Surabaya, April 2013
- [7] Katsuhiko Ogata, *Teknik Kontrol Outomatik (Sistem Pengaturan)*, Jilid 1, Erlangga, 1985.
- [8] Josaphat Pramudijanto, *Kontroler PID*, Handout Mata Kuliah Dasar Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- [9] Putri Suryaditya, Nindita., *“Pengaturan Proses Face Miling pada Mesin Computer Numerikal Control (CNC) dengan Kontroler Fuzzy-PID”*, *Tugas Akhir*, JTE-ITS, Surabaya, 2013
- [10] Nurlita Gamayanti, *Karakteristik Sistem Orde Dua*, Handout Mata Kuliah Dasar Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- [11] _____, *“E30S4-100-3-N-5”*, Autonocs, Januari, 2015.
<http://products.autoniconline.com/item/rs-rotary-encoder-incremental-shaft-type-encoders/e30s4-100-3-n-5-2>
- [12] Matra Alfian, Rizki. *“Perancangan dan Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Kontroler PID Fuzzy dengan PLC”*, *Tugas Akhir*, JTE-ITS, Surabaya, 2013.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

A. Datasheet Perangkat Keras yang Digunakan

1. DAQ USB 4716 Advantech

USB-4716

200 kS/s, 16-bit, 16-ch Multifunction USB Module



CE FCC

Features

- Supports USB 2.0
- Portable
- Bus-powered
- 16 analog input channels
- 16-bit resolution AI
- Sampling rate up to 200 KS/s
- 8-ch DVB-ch DO, 2-ch AO and one 32-bit counter
- Detachable screw terminal on modules
- Suitable for DIN-rail mounting
- One lockable USB cable for secure connection included

Introduction

The USB-4700 series consists of true plug & play data acquisition devices. No more opening up your computer chassis to install boards—just plug in the module, then get the data. It's easy and efficient. USB-4716 offers 16 single-ended/ 8 differential inputs with 16-bit resolution, up to 200 KS/s throughput, 16 digital I/O lines and 1 user counter, add two 16-bit analog outputs. The high performance makes USB-4716 your best choice for test & measurement applications in the production line or in the lab.

Reliable and rugged enough for industrial applications, yet inexpensive enough for home projects, the USB-4716 is the perfect way to add measurement and control capability to any USB capable computer. The USB-4700 series is truly plug & play and easy to use. It obtains all required power from the USB port, so no external power connection is ever required.

Specifications

Analog Input

- **Channels** 16 single-ended/ 8 differential (software programmable)
- **Resolution** 16 bits
- **Max. Sampling Rate** 200 KS/s (for USB 2.0)
Note: The sampling rate for each channels will be affected by used channel number. For example, if 4 channels are used, the sampling rate is 200K/4 = 50 KS/s per channel.
- **FIFO Size** 1,024 samples
- **Overvoltage Protection** 30 V₀₋₉
- **Input Impedance** 1 G Ω
- **Sampling Modes** Software, onboard programmable pair, or external
- **Input Range (V, software programmable) & Absolute Accuracy**

	N/A	0 ~ 10	0 ~ 5	0 ~ 2.5	0 ~ 1.25
Single Ended	N/A	± 10	± 5	± 2.5	± 1.25
Differential	N/A	± 5	± 2.5	± 1.25	± 0.625
Absolute Accuracy (% of FS)*	0.05	0.03	0.03	0.05	0.1

* ± 1 LSB is added as the derivative for absolute accuracy

Analog Output

- **Channels** 2
 - **Resolution** 16 bits
 - **Static update**
 - **Output Rate** (V, software programmable)
 - **Output Range**
- | Internal Reference | Unipolar Bipolar | 0 ~ 5, 0 ~ 10 |
|--------------------|------------------|-----------------|
| | | $\pm 5, \pm 10$ |
- **Stow Rate** 0.7 V/s
 - **Driving Capability** 5 mA
 - **Output Impedance** 0.1 Ω max.
 - **Operation Mode** Single output
 - **Accuracy** Relative: ± 1 LSB

Digital Input

- **Channels** 8
- **Compatibility** 3.3 V/5 V TTL
- **Input Voltage** Logic 0: 1.0 V max.
Logic 1: 2.0 V min.

Digital Output

- **Channels** 8
- **Compatibility** 3.3 V TTL
- **Output Voltage** Logic 0: 0.4 V max.
Logic 1: 2.4 V min.
Sink: 6 mA (sink)
Source: 6 mA (source)
- **Output Capability**

Event Counter

- **Channels** 1
- **Compatibility** 3.3V/TTL
- **Max. Input Frequency** 1 kHz

General

- **Bus Type** USB 2.0
- **I/O Connector** Onboard screw terminal
- **Dimensions (L x W x H)** 132 x 40 x 32 mm (5.2" x 3.15" x 1.26")
Typical: 5 V @ 350 mA
Max: 5 V @ 450 mA
- **Power Consumption**
- **Operating Temperature** 0 ~ 60°C (32 ~ 158°F) (refer to IEC 68-2-1, 2)
- **Storage Temperature** -20 ~ 70°C (-4 ~ 158°F)
- **Operating Humidity** 5 ~ 85% RH non-condensing (refer to IEC 68-2-2, -2, -3)
- **Storage Humidity** 5 ~ 85% RH non-condensing (refer to IEC 68-2-1, -2, -3)

Ordering Information

- **USB-4716-AE** 200 KS/s, 16-bit, 16-ch Multi USB Module

Accessories

- 1960004544 Wallmount Bracket
- 1960005788 VESA Mount Bracket

2. Rotary Encoder Siemens E30s4-100-3-N-5

Incremental Shaft



Features:

- Miniature ø30mm shaft type rotary encoder
- Easy installation at narrow space
- Small inertia moment
- Wide range of power supply : 5VDC, 12-24VDC $\pm 5\%$
- Various output types

Description:

Diameter ø30mm shaft type incremental rotary encoder E30S Series is easy to be installed at narrow space by minimizing space limit. Small moment of inertia is another feature of the series to optimize user convenience.

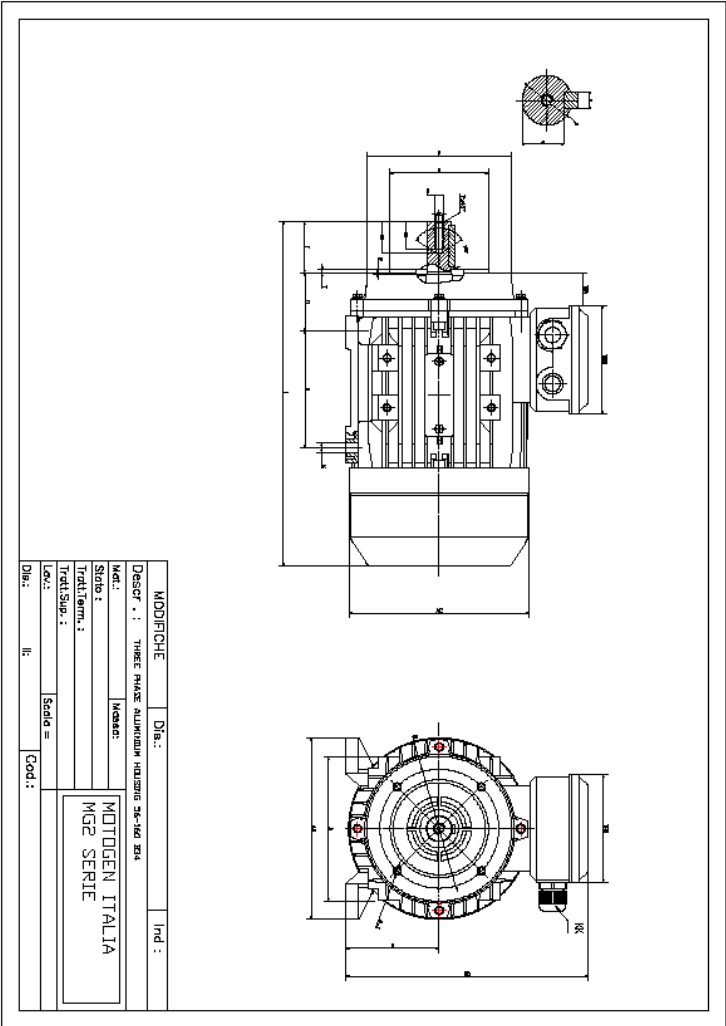
Specifications:

Item		Diameter ø30mm shaft type of incrementa rotary encoder	
Resolution(P/R)		100, 200, 360, 500, 1000, 1024, 3000 (Not indicated resolution is customizable.)	
		A, B, Z phase(Line driver : A, A, B, B, Z, Z phase)	
		Phase difference of output	
		Phase difference between A and B : $T/4 \pm T/8$ (T = 1 cycle of A phase)	
Electrical specification	Control output	Totem pole output	Low Load current : Max. 30mA, Residual voltage : Max. 0.4V DC High Load current : Max. 10mA, Output voltage(Power supply 5V DC) : Min. (Power supply - 2)V DC, Output voltage(Power supply 12-24V DC) : Min. (Power supply - 3)V DC
			Load current : Max. 30mA, Residual voltage : Max. 0.4V DC
		NPN open collector output	Load current : Max. 10mA, Residual voltage : Max. 0.4V DC
		Voltage output	Low Load current : Max. 20mA, Residual voltage : Max. 0.5V DC High Load current : Max. -20mA, Output voltage : Min. 2.5V DC
		Line driver output	
	Response time (Rise/Fall)	Totem pole output	Max. 1 μ s
		NPN open collector output	Max. 1 μ s
		Voltage output	Max. 1 μ s (5V DC : Output resistance 820 Ω), Max. 2 μ s (12 to 24V DC : Output resistance 4.7k Ω)
		Line driver output	Max. 0.5 μ s
	Max. Response frequency		300kHz
		Power supply	5V DC $\pm 5\%$ (Ripple P-P : Max. 5%) 12 to 24V DC $\pm 5\%$ (Ripple P-P : Max. 5%)
		Current consumption	Max. 80mA (disconnection of the load), Line driver output : Max. 50mA(disconnection of the load)
		Insulation resistance	Min. 100M Ω (at 500V DC megger between all terminals and case)
		Dielectric strength	750V AC 50/60Hz for 1 minute(Between all terminals and case)
		Connection	Cable outgoing type, 250mm cable outgoing connector type

www.element14.com
www.farnell.com
www.newark.com

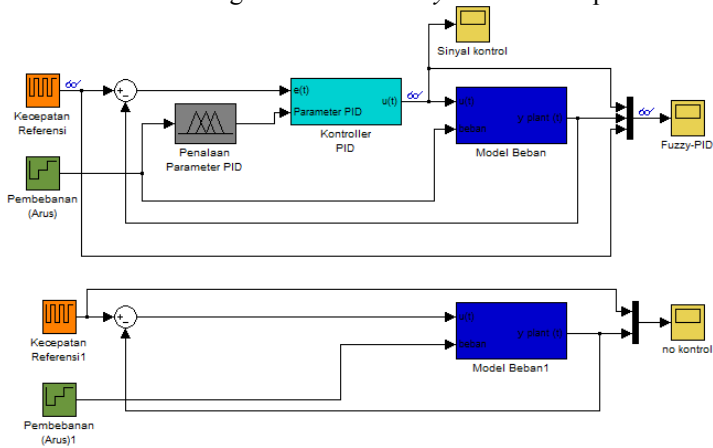


3. Three Phase B34 56-160 Draw

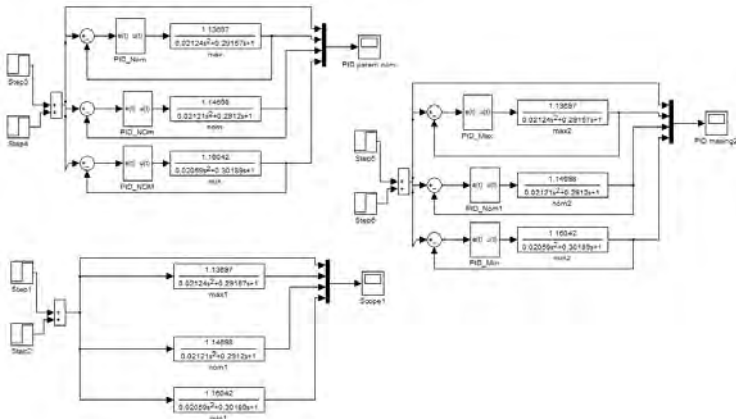


B. Simulasi Kontroler *Fuzzy*-PID dengan Simulink Matlab R2010a

1. Simulasi dengan Kontroler *Fuzzy*-PID dan Tanpa Kontroler



2. Simulasi dengan kontroler PID

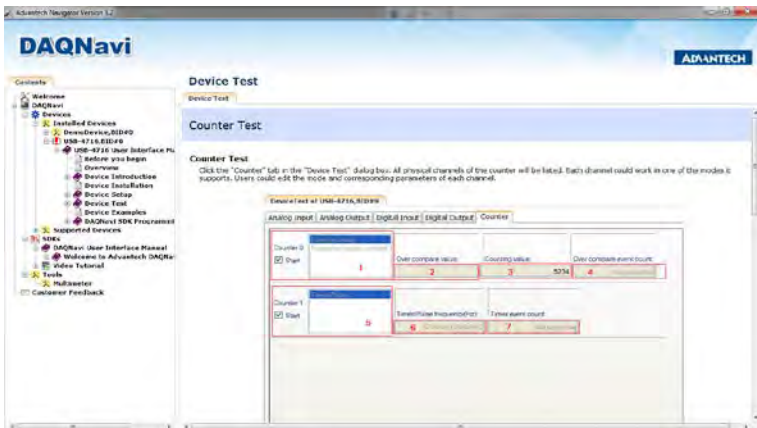


C. Program M.file Pemilihan Arus Pembebanan

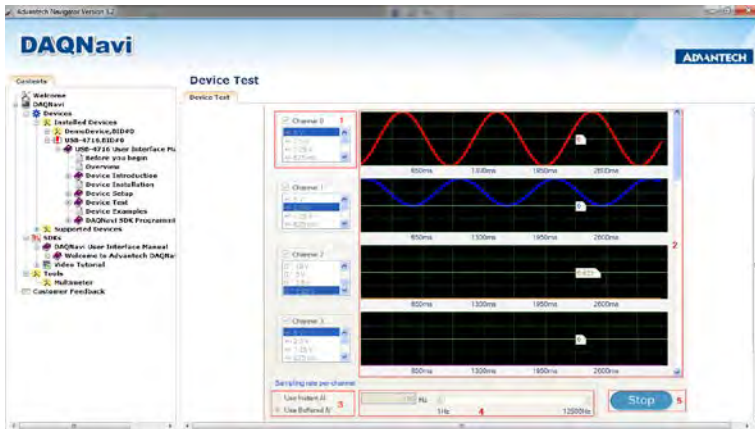
```
function [beban] = PemilihanArus(arus)
if arus == 2.4
    beban = 1
elseif arus == 2.4
    beban = 2
elseif arus == 2.5
    beban = 3
elseif arus == 2.6
    beban = 4
else
    beban = 0
end
end
```

D. Tampilan Perangkat lunak DAQ Advantech Navigator

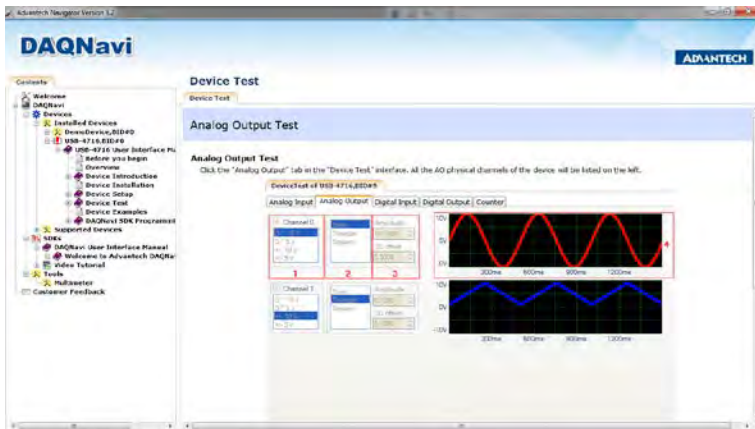
1. Tes *Counter* untuk Pin Evt_In Masukan *Encoder*



2. Tes Analog Input untuk Masukan Sensor Arus

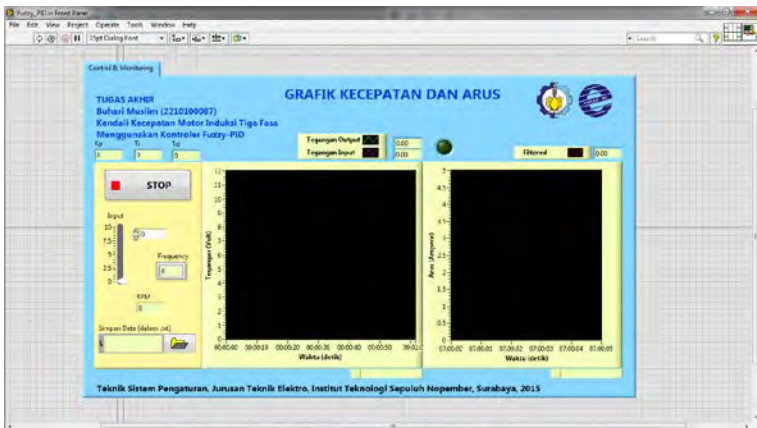


3. Tes Analog Output untuk Keluaran Sinyal Kontrol

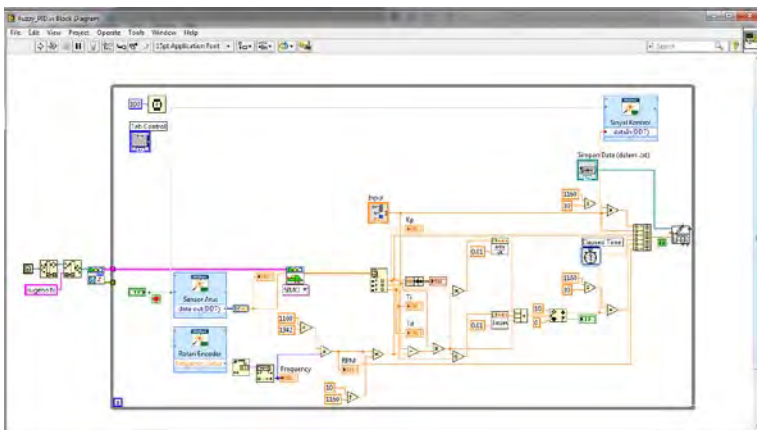


E. Implementasi Kontroler *Fuzzy*-PID dengan Perangkat Lunak Labview 2013

1. Tampak depan atau *Front Panel* Program Labview



2. Tampak dalam atau *Diagram Blok* Program Labview



Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



Buhari Muslim adalah nama lengkap penulis yang akrab dipanggil Hori. Penulis dilahirkan di Probolinggo tanggal 11 Agustus 1990 yang merupakan putra ketiga dari tiga bersaudara pasangan Usman dan Fatimah. Penulis memulai pendidikannya dari SDN 2 Kramat Agung, PonPes Umul Ulum Leces Probolinggo, SMP Sunan Giri Probolinggo, dan SMAN 1 Probolinggo. Setelah tamat SMA, penulis melanjutkan studinya di [Teknik Elektro ITS](#), kemudian fokus pada bidang studi Teknik Sistem Pengaturan. Pada bulan Juni 2015 penulis mengikuti seminar dan ujian Tugas Akhir sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro dari [Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya](#)